

Е.Л. МАРШАК

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

БИБЛИОТЕЧКА СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИКА

Е.Л.МАРШАК

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

БИБЛИОТЕЧКА СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИКА

МОСКВА «КОЛОС» 1974

631.3
М 30
УДК 631.371:621.313.333.004.67.001.24

Маршак Евсей Львович

М 30 Расчет асинхронных двигателей при ремонте. М., «Колос», 1974.

111 с. с ил. (Б-чка сельск. электрика).

В книге приводятся сведения об обмотках асинхронных электродвигателей, применяемых в сельскохозяйственном производстве, даются указания по способам составления схем обмоток, описываются их свойства, даются рекомендации по их выбору при ремонте. В общедоступной форме излагается методика приближенного расчета обмоток с сохранением заводских параметров электродвигателя и перерасчета на изменение напряжения и частоты вращения. Изложение иллюстрируется рядом примеров. Помещены основные справочные материалы, необходимые для расчетов.

Брошюра предназначена сельским электрикам.

М $\frac{40204-098}{035(01)-74}$ 163-74 631.3

Поступающий в ремонт электродвигатель снабжен, как правило, заводским паспортным щитком (паспортная табличка). По обмотке и сведениям, указанным на щитке, не составляет труда определить паспортные и обмоточные данные электродвигателя.

Для электродвигателей самых разнообразных серий и типов, как выпускаемых в настоящее время, так и снятых с производства, конструктивные и обмоточные данные опубликованы в специальных альбомах [12].

Если сохранился заводской паспорт и обмотка электродвигателя, есть данные по обмотке в соответствующем альбоме и если у отремонтированного двигателя требуется сохранить заводские параметры — частоту (скорость) вращения и напряжение, то нет надобности проводить перерасчет двигателя. Достаточно убедиться в идентичности фактического исполнения обмотки и обмоточных данных, приведенных в альбоме, и полностью повторить заводское исполнение.

Если же нет никаких сведений, следует с максимальной тщательностью измерить активные части электродвигателя (внешний и внутренний диаметры и длину сердечников статора и ротора), пересчитать число пазов статора и ротора и попытаться найти в альбоме тип электродвигателя, соответствующие данные которого полностью совпали бы с замеренными. Если таким способом будет точно установлен тип электродвигателя, также нет надобности проводить расчет обмотки; ее следует выполнить по данным, соответствующим выявленному типу.

Если нет паспортного щитка и обмотки, необходимость расчета очевидна. Но даже и в том случае, когда сохранился заводской щиток электродвигателя и обмотка находится в том состоянии, что можно определить обмоточные данные, требуется рассчитать обмотку. Это

объясняется тем, что электродвигатель мог ремонтироваться ранее с отступлениями от заводского исполнения, причем эти отступления могли быть недопустимыми и предположительно могли послужить причиной выхода электродвигателя из строя. Расчетным путем следует установить, соответствует ли обмотка электродвигателя его паспортным данным, в норме ли находятся его электромагнитные нагрузки.

Расчеты обмоток также необходимы для ремонта, связанного с изменением частоты вращения и напряжения. Задача заключается в определении новых обмоточных данных и новой мощности электродвигателя, когда нет требуемого провода или электроизоляционных материалов, или когда не представляется возможным заложить в пазы необходимое число проводов. Тогда расчетным путем определяется возможность изменения обмоточных данных электродвигателя и влияние этого изменения на его параметры.

Расчет обязателен также и при замене медного провода обмотки на алюминиевый. Здесь надо выбрать оптимальные обмоточные данные, такие, при которых мощность электродвигателя сохраняется или снижается в минимальной степени.

Таким образом, при ремонте электродвигателя, в зависимости от его состояния и характера ремонта должен производиться один из следующих видов расчета.

Поверочный расчет электродвигателей, не охваченных альбомом обмоточных данных, как при сохранившейся, так и при отсутствующей обмотке — для проверки соответствия фактических обмоточных данных заводским и для сопоставления электромагнитных нагрузок ремонтируемого электродвигателя с допустимыми нагрузками.

Расчет при изменении параметров электродвигателя — для определения обмоточных данных, обеспечивающих новые измененные параметры.

Расчет при изменении заполнения паза — для оценки влияния изменения обмоточных и конструктивных данных (размеров провода, числа витков, заложенных в паз, вида пазовой изоляции и др.) на мощность электродвигателя.

Расчет при изменении материала провода (замена медного провода на алюминиевый) — для оценки влияния этой замены на мощность электродвигателя.

Расчет для определения (восстановления) параметров электродвигателя — для электродвигателей, не охваченных альбомом обмоточных данных, при отсутствии заводского паспортного щитка и демонтированной обмотки. Последний вид расчета, являющийся наиболее сложным, может дать только приближенное решение, которое должно быть уточнено по результатам испытания отремонтированного электродвигателя.

Как указывалось выше, основным критерием для расчета электродвигателя, у которого отсутствуют заводской паспортный щиток и обмотка, являются снятые с натуры размеры стальных сердечников, поэтому все измерения следует проводить с максимальной тщательностью, повторяя каждое измерение 2—3 раза и пользуясь абсолютно исправными измерительными инструментами.

Предварительно перед измерением электродвигатель необходимо очистить от грязи, краски и лака. Особо важно очистить пазы от остатков старой изоляции.

Длину сердечника (статора или ротора) следует измерять не по наружной поверхности, а по пазовой части, закладывая измерительную линейку на дно паза. Измерение длины сердечника по головкам зубцов может дать неправильные результаты, так как во многих случаях на торцах сердечника зубцы расходятся — отгибаются в аксиальном направлении.

Наружный диаметр сердечника статора или внутренний диаметр сердечника ротора не всегда доступен для непосредственного измерения. В этих случаях приходится прибегать к косвенным способам, например, замерив внутренний диаметр сердечника статора D_1, высоту зубца $h_{з1}$, высоту спинки $h_{с1}$, определяют наружный диаметр сердечника статора $D_{н1}$ из соотношения:

$$D_{н1}=D_1+2h_{з1}+2h_{с1}.$$

Пазы закрытой и полузакрытой формы рекомендуется измерять, снимая оттиски на пластинки свинца или электрокартона, а открытые пазы — непосредственно штангенциркулем, линейкой, калибром и др.

Наиболее распространенные формы пазов, а также расчетные формулы для определения их площади приведены на рисунке 1.

Толщину стальных листов следует определить, замерив расстояние между двумя радиальными вентиляци-

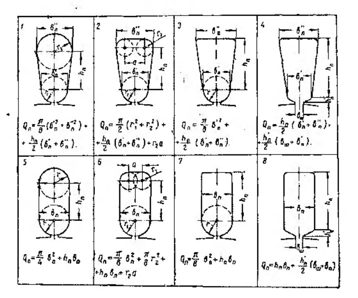


Рис. 1. Наиболее распространенные формы пазов.

онными каналами (а при отсутствии каналов — длину всего сердечника стали) l и подсчитав количество листов стали на указанном участке $n_л$.

Толщина листа

$$l_л = kl/n_л,$$

где k — коэффициент, зависящий от вида межлистовой изоляции и составляющий: 0,87—0,90 — при бумажной изоляции (встречается у электродвигателей очень старых выпусков); 0,91—0,93 — при лаковой изоляции; 0,93—0,95 — при оксидной изоляции или при отсутствии изоляции.

Сердечники статора обычно набирают из листов толщиной 0,5 мм и реже из листов толщиной 0,35 мм. Таким образом, определить толщину листа можно совершенно безошибочно.

Воздушный зазор следует измерять с двух противоположных торцов электродвигателя при помощи калиброванного щупа, вводимого через специальные или смотровые люки в торцевых щитах. С каждой стороны из-

мерение нужно проводить в четырех точках, смещенных одна относительно другой на 90°; величина зазора принимается как среднеарифметическая всех замеров.

У некоторых электродвигателей люков в щитах нет. В таких случаях зазор можно измерить только после разборки. Для этого ротор укладывают непосредственно на статор и замеряют зазор δ_1 против самой верхней части расточки статора. Вслед за тем ротор поворачивают на 90° и вновь замеряют зазор против той же точки статора — δ_2.

Величина зазора

$$\delta_{ср} = (\delta_1 + \delta_2)/4.$$

Для проверки правильности измерения можно руководствоваться таблицей 1. Данные, приведенные в ней, ориентировочные.

Таблица 1

Частота вращения, об/мин	Зазор (мм) при мощности электродвигателя, кВт									
	до 0,2	0,2—1,0	1—2,5	2,5—5,0	5,0—10,0	10—20	20—50	50—100	100—200	200—300
500—1500	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,65	0,8	1,0
3000	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,65	0,8	1,0	1,25	1,5

Следует отметить, что в отличие от расчетов электрических машин, проводимых на машиностроительных заводах, когда при расчете определяют размеры сердечников активной стали статора и ротора и выбирают число пазов, при ремонте задача значительно упрощается; расчет выполняется применительно к существующим сердечникам и сводится к выбору типа обмотки, определению числа витков в пазу и сечения провода, при которых достигается оптимальное соотношение магнитных (в активной стали) и электрических (в обмотке) нагрузок.

Основными электродвигателями, эксплуатируемыми в сельском хозяйстве, являются односкоростные асинхронные электродвигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором единой серии А2, АО2 и АОЛ2 мощностью от 0,6 до 100 кВт.

Таблица 2

Тип	Паспортные данные						Конструктивные данные					Обмотка статора					
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	$\cos\varphi$	$D_{н1}/D_i$, мм	l_1/l_2, мм	δ, мм	Z_1/Z_2	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эк1}$	n_1	a_1	d_1, мм	G, кг
Электродвигатели 1-го габарита																	
АОЛ2-11-2	0,8	127/220	5,4/3,1	2830	77,0	0,86	133/73	54/56	0,4	24/20	89	1—12	56	1	1	0,86	1,425
		220/380	3,1/1,8									2—11	97	1	1	0,64	1,38
		500	1,37										128	1	1	0,57	1,44
АОЛ2-12-2	1,1	127/220	7,3/4,2	2830	78,5	0,87	133/73	67/69	0,4	24/20	89	1—12	45	1	1	0,96	1,52
		220/380	4,2/2,4									2—11	78	1	1	0,72	1,46
		500	1,83										103	1	1	0,64	1,56
АОЛ2-11-4	0,6	127/220	5,0/2,9	1350	71,0	0,76	133/80	54/56	0,3	24/30	87	1—8	75	1	1	0,74	1,175
		220/380	2,9/1,7									2—7	129	1	1	0,57	1,188
		500	1,3										170	1	1	0,49	1,245
АОЛ2-12-4	0,8	127/220	6,2/3,6	1350	73,5	0,78	133/80	67/69	0,3	24/30	87	1—8	62	1	1	0,83	1,36
		220/380	3,6/2,1									2—7	107	1	1	0,62	1,31
		500	1,6										141	1	1	0,55	1,36
АОЛ2-11-6	0,4	127/220	4,2/2,4	910	66,0	0,65	133/80	67/69	0,3	36/26	80	1—8	69	1	1	0,72	1,42
		220/380	2,4/1,4									2—7	120	1	1	0,55	1,448
		500	1,07										158	1	1	0,49	1,52
АОЛ2-12-6	0,6	127/220	6,0/3,5	910	68,0	0,68	133/80	77/79	0,3	36/26	80	1—8	55	1	1	0,86	1,665
		220/380	3,5/2,0									2—7	95	1	1	0,64	1,605
		500	1,5										125	1	1	0,55	1,665

АО2-11-2	0,8	127/220 220/380 500	5,41/3,13 3,13/1,81 1,38	2800	78,0	0,86	133/73	52/54	0,35	24/20	65,7	1—12 2—11	56 97 128	1 1 1	1 1 1	0,86 0,64 0,55	1,57 1,46 1,42
АО2-12-2	1,1	127/220 220/380 500	7,2/4,17 4,17/2,41 1,83	2800	79,5	0,87	133/73	65/67	0,35	24/20	65,7	1—12 2—11	45 78 103	1 1 1	1 1 1	0,96 0,72 0,62	1,61 1,56 1,54
АО2-11-4	0,6	127/220 220/380 500	5,0/2,88 2,88/1,66 1,26	1370	72,0	0,76	133/80	52/54	0,25	24/30	67,1	1—8 2—7	75 129 170	1 1 1	1 1 1	0,74 0,57 0,49	1,17 1,19 1,16
АО2-12-4	0,8	127/220 220/380 500	6,2/3,6 3,6/2,08 1,58	1370	74,5	0,78	133/80	65/67	0,25	24/30	67,1	1—8 2—7	62 107 141	1 1 1	1 1 1	0,83 0,62 0,53	1,31 1,26 1,22
АО2-11-6	0,4	127/220 220/380 500	4,1/2,38 2,38/1,37 1,04	920	68,0	0,65	133/80	65/67	0,25	24/26	65,5	1—8 2—7	70 122 160	1 1 1	1 1 1	0,74 0,55 0,49	1,58 1,51 1,57
АО2-12-6	0,6	127/220 220/380 500	5,7/3,3 3,3/1,91 -1,45	920	70,0	0,68	133/80	75/77	0,25	24/26	65,5	1—8 2—7	55 95 125	1 1 1	1 1 1	0,83 0,64 0,55	1,66 1,70 1,65
Электродвигатели 2-го габарита																	
АОЛ2-21-2	1,5	127/220 220/380 500	9,9/5,7. 5,7/3,3 2,5	2860	79,0	0,88	153/86	65/67	0,45	24/20	108	1—12 2—11	40 69 91	1 1 1	1 1 1	0,16 0,86 0,74	2,26 2,15 2,11
АОЛ2-22-2	2,2	127/220 220/380 500	13,5/7,8 7,8/4,5 3,4	2860	83,0	0,89	153/86	92/94	0,45	24/20	108	1—12 2—11	31 54 71	1 1 1	1 1 1	1,25 0,96 0,83	2,25 2,32 2,28
АОЛ2-21-4	1,1	127/220 220/380 500	8,1/4,7 4,7/2,7 2,05	1400	78,0	0,79	153/94	70/72	0,3	24/30	113	1—8 2—7	53 92 121	1 1 1	1 1 1	1,0 0,77 0,67	1,83 1,89 1,88

Продолжение

Тип	Паспортные данные						Конструктивные данные					Обмотка статора					
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	$\cos\varphi$	$D_{н1}/D_1$, мм	l_1/l_2, мм	δ, мм	Z_1/Z_2	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эк1}$	m_1	a_1	d_1, мм	G, кг
АОЛ2-22-4	1,5	127/220 220/380 500	10,6/6,1 6,1/3,5 2,65	1400	80,0	0,81	153/94	97/99	0,3	24/30	113	1—8 2—7	41 71 94	1 1 1	1 1 1	1,16 0,90 0,77	2,15 2,24 2,18
АОЛ2-21-6	0,8	127/220 220/380 500	7,1/4,1 4,1/2,4 1,8	930	72,0	0,71	153/98	70/72	0,3	36/26	79	1—8 2—7	49 85 112	1 1 1	1 1 1	0,93 0,69 0,62	1,89 1,81 1,93
АОЛ2-22-6	1,1	127/220 220/380 500	9,0/5,2 5,2/3,0 2,3	930	76,0	0,73	153/98	97/99	0,3	36/26	79	1—8 2—7	37 65 86	1 1 1	1 1 1	1,04 0,8 0,69	2,06 2,15 2,11
АО2-21-2	1,5	220/380 500	5,5/3,2 2,4	2860	80,5	0,88	153/86	65	0,4	24/20	115	1—12 2—11	69 91	1 1	1 1	0,86 0,74	2,10 2,13
АО2-22-2	2,2	220/380 500	7,8/4,5 3,4	2860	83,0	0,89	153/86	92	0,4	24/20	115	1—12 2—11	54 71	1 1	1 1	0,96 0,86	2,31 2,43
АО2-21-4	1,1	220/380 500	4,6/2,7 2,0	1410	78,0	0,80	153/94	72	0,25	24/30	120	1—8 2—7	92 121	1 1	1 1	0,77 0,67	1,86 1,85
АО2-22-4	1,5	220/380 500	6,1/3,5 2,7	1410	80,0	0,81	153/94	97	0,25	24/30	120	1—8 2—7	71 93	1 1	1 1	0,90 0,77	2,20 2,11
АО2-21-6	0,8	220/380 500	4,0/2,3 1,8	980	73,0	0,71	153/98	72	0,25	36/26	86	1—8 2—7	85 112	1 1	1 1	0,69 0,62	1,74 1,85

АО2-22-6	1,1	220/380 500	5,2/3,0 2,3	930	76,0	0,73	153/98	97	0,25	36/26	86	1—8 2—7	65 86	1 1	1 1	0,80 0,69	2,06 2,02

Электродвигатели 3-го габарита

АОЛ2-31-2	3,0	127/220 220/380 500	18,2/10,5 10,5/6,1 4,6	2880	84,0	0,69	180/106	90/93	0,5	24/20	145	1—12 2—11 3—10	30 51 67	2 2 1	1 1 1	1,12 0,86 1,04	3,52 3,54 3,35
АОЛ2-32-2	4,0	127/220 220/380 500	24/14 14/8 6,1	2880	85,5	0,89	180/106	117/120	0,5	24/20	145	1—12 2—11 3—10	23 40 53	2 2 2	1 1 1	1,3 0,98 0,83	4,02 3,86 3,84
АОЛ2-31-4	2,2	127/220 220/380 500	14,8/8,6 8,6/4,9 3,75	1430	82,5	0,82	180/112	90/93	0,35	36/26	97	1—12 2—11 3—10	24 42 56	1 1 1	1 1 1	1,45 1,08 0,93	3,06 2,99 2,96
АОЛ2-32-4	3,0	127/220 220/380 500	19,8/11,4 11,4/6,6 5,0	1430	83,0	0,83	180/112	117/120	0,35	36/26	97	1—12 2—11 3—10	19 33 43	2 1 1	1 1 1	1,16 1,25 1,08	3,47 3,49 3,40
АОЛ2-31-6	1,5	127/220 220/360 500	11,6/6,7 6,7/3,9 2,95	950	78,0	0,75	180/118	90/93	0,35	36/44	129	1—8 2—7	35 60 79	1 1 1	1 1 1	1,35 1,04 0,9	3,34 3,42 3,38
АОЛ2-32-6	2,2	127/220 220/380 500	16,2/9,4 9,4/5,4 4,1	950	80,0	0,77	180/118	117/120	0,35	36/44	129	1—8 2—7	26 46 60	2 2 1	1 1 1	1,12 0,83 1,04	3,90 3,80 3,88
АО2-31-2	3,0	220/380 380 500	11,6/6,0 6,0 4,6	2880	84,5	0,89	180/106,	90/91	0,5	24/20	152	1—9	26 45 34	1 1 1	1 1 1	1,16 0,9 1,04	3,15 3,80 3,33

Продолжение

Тип	Паспортные данные						Конструктивные данные					Обмотка статора					
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	$\cos\varphi$	$D_н/D_1$, мм	l_1/l_2, мм	δ, мм	Z_1/Z_2	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эк1}$	n_1	a_1	d_1, мм	G, кг
АО2-32-2	4,0	220/380 380 500	14,8/8,0 0 6,1	2880	35,5	0,89	180/106	117/118	0,5	24/20	152	1—9	21 38 28	2 1 1	1 1 1	0,96 1,0 1,16	3,34 3,78 3,75
АО2-31-4	2,2	220/380 500	8,4/4,9 3,7	1430	82,5	0,83	180/112	90/91	0,3	36/26	103	1—12 2—11 3—10	43 57	1 1	1 1	1,08 0,96	3,09 3,21
АО2-32-4	3,0	220/380 380 500	11/65 6,5 4,9	1430	83,5	0,84	180/112	117/118	0,3	36/26	103	1—12 2—11 3—10	34 59 45	1 1 1	1 1 1	1,25 0,93 1,08	3,63 3,45 3,57
АО2-31-6	1,5	220/380 500	6,6/3,8 2,9	950	79,0	0,75	180/122	90/91	0,3	36/46	132	1—8 2—7	62 81	1 1	1 1	1,0 0,9	3,39 3,57
АО2-32-6	2,2	220/380 500	9,3/5,4 4,1	950	81,0	0,77	180/122	117/118	0,3	36/46	132	1—8 2—7	47 62	1 1	1 1	1,2 1,04	4,17 4,11

Электродвигатели 4-го габарита

Тип	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	$\cos\varphi$	$D_н/D_1$, мм	l_1/l_2, мм	δ, мм	Z_1/Z_2	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эк1}$	n_1	a_1	d_1, мм	G, кг
АО2-41-2	5,5	220/380 380 500	18,5/10,7 10,7 8,12	2910	87,0	0 90	208/123	110/113	0,7	24/20	205	1—10	17 29 22	2 1 2	1 1 1	1,25 1,35 1,08	6,29 6,24 6,08

АО2-42-2	7,5	220/380	24,6/14,2	2910	88,0	0,91	208/123	148/151	0,7	24/20	205	1—10	27	1	2	1,4	6,97
		380	14,2										47	1	2	1,04	6,75
		500	10,8										36	1	2	1,20	6,9
АО2-41-4	4,0	220/380	14,3/8,3	1450	86,0	0,85	208/138	110/113	0,35	36/26	143	1—12	34	1	1	1,50	5,67
		380	8,3									2—11	59	1	1	1,12	5,53
		500	6,3									3—10	45	1	1	1,30	5,68
АО2-42-4	5,5	220/380	19,0/11,0	1450	88,0	0,86	208/133	148/151	0,35	36/26	143	1—12	24	2	1	1,25	6,37
		380	11,0									2—11	42	1	1	1,35	6,46
		500	8,4									3—10	32	1	1	1,56	6,63
АО2-41-6	3,0	220/360	12,1/7,1	960	83,0	0,78	208/144	110/113	0,38	36/46	152	1—8	41	1	1	1,40	5,13
		380	7,1									2—7	71	1	1	1,04	4,94
		500	5,37										54	1	1	1,20	5,00
АО2-42-6	4,0	220/380	15,7/9,1	960	84,5	0,79	208/144	148/151	0,35	86/46	152	1—8	32	1	1	1,12	5,93
		380	9,1									2—7	55	1	1	1,20	5,87
		500	6,94										42	1	1	1,40	6,05
АО2-41-8	2,2	220/380	10,4/6,0	720	81,0	0,69	208/144	110/113	0,35	36/46	152	1—5	26	1	1	1,25	4,40
		380	6,0										45	1	1	0,93	4,21
		500	4,55										34	1	1	1,08	4,30
АО2-42-8	3,0	220/380	13,8/8,0	720	81,5	0,70	208/144	148/151	0,35	36/46	152	1—5	20	1	1	1,40	5,05
		380	8,0										35	1	1	1,04	4,88
		500	6,08										26	1	1	1,2	4,85

Электродвигатели 5-го габарита

АО2-51-2; АО2-51-2сх	10	220/380	33/19	2920	88,0	0,69	243/140	135/139	0,7	24/20	297	1—10	25	2	2	1,3	11,60
АО2-52-2; АО2-52-2сх	13	220/380	43/25	2920	88,5	0,90	243/140	170/174	0,7	24/20	297	1—10	21	2	2	1,4	12,30

Продолжение

Тип	Паспортные данные						Конструктивные данные					Обмотка статора					
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	$\cos\varphi$	$D_{н1}/D_1$, мм	l_1/l_2, мм	δ, мм	Z_1/Z_2	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{пк}$	m_1	a_1	d_1, мм	Q, кг
АО2-51-4	7,5	220/380	26/19	1460	88,5	0,87	243/158	135/139	0,45	36/46	187	1—8	13	2	1	1,4	8,05
АО2-52-4	10	220/380	33/19	1460	89,0	0,88	243/173	170/174	0,45	36/46	187	1—8	10	3	1	1,3	8,90
АО2-51-6	5,5	220/380	21/12	970	85,5	0,81	243/173	135/139	0,4	36/46	169	1—6	15	2	1	1,2	6,10
АО2-52-6	7,5	220/380	28/16	970	87,0	0,82	243/173	190/194	0,4	36/46	169	1—6	11	2	1	1,45	7,80
АО2-51-8	4,0	220/380	17/10	730	84,0	0,71	243/173	135/139	0,4	36/46	169	1—5	18	1	1	1,56	5,75
АО2-52-8	5,5	220/380	24/14	730	85,0	0,72	243/173	190/194	0,4	36/46	169	1—5	13	2	1	1,3	7,05
Электродвигатели 6-го габарита																	
А2-61-2	17	220/380 500	57,8/33,3 25,4	2910	88,0	0,88	291/153	110/113	0,7	36/28	227	1—12	15 20	2 2	2 2	1,4 1,2	11,1 10,95
А2-62-2	22	220/380 500	73,8/42,7 32,4	2910	89,0	0,88	281/153	135/138	0,7	36/28	227	1—12	13 17	2 2	2 2	1,5 1,3	11,75 11,55
А2-61-4	13	220/380 500	44/25,4 19,3	1450	88,5	0,88	291/180	120/123	0,55	36/46	253	1—8	20 26	2 1	2 2	1,25 1,56	10,15 10,20
А2-62-4	17	220/380 500	56,4/32,6 25,0	1450	89,5	0,88	291/180	150/153	0,55	36/46	253	1—8	16 21	2 2	2 2	1,4 1,2	11,10 10,75
А2-61-6	10	220/380 500	35/20,3 15,4	965	87,0	0,86	291/206	120/123	0,4	54/64	178	1—8	19 25	1 1	2 2	1,5 1,3	8,87 8,80
А2-62-6	13	220/380 500	45/26 19,8	965	86,0	0,86	291/206	165/168	0,4	54/64	178	1—8	14 18	2 1	2 2	1,25 1,56	10,75 10,72

А2-61-8	7,5	220/380 500	29,6/17,1 13,0	725	85,0	0,78	291/206	120/123	0,4	54/64	178	1—7	22 29	1 1	2 2	1,4 1,2	8,71 8,49
А2-62-8	10	220/380 500	37,8/21,8 16,6	725	87,0	0,80	291/206	165/168	0,4	54/64	178	1—7	16 21	2 1	2 2	1,2 1,5	11,12 10,95
АО2-62-2 АО2-62-2сх	17	220/380 500	57/33 25	2910	88,0	0,9	291/153	150/153	0,7	36/28	227	1—12	13 17	2 2	2 2	1,45 1,25	11,43 11,10
АО2-61-4	13	220/380 500	43,5/25 19,3	1450	88,5	0,89	291/180	135/138	0,55	36/46	253	1—8	19 25	2 1	2 2	1,25 1,56	10,00 10,25
АО2-62-4	17	220/380 500	56,5/32,6 24,8	1450	89,0	0,89	291/180	165/168	0,55	36/46	253	1—8	15 20	2 2	2 2	1,4 1,25	13,20 13,38
АО2-61-6	10	220/380 500	33,6/19,4 14,8	970	88,0	0,89	291/206	150/153	0,4	54/64	178	1—8	17 22	1 1	2 2	1,56 1,35	9,65 9,33
АО2-62-6	13	220/380 500	43,7/25,2 19,2	965	88,0	0,89	291/206	190/193	0,4	54/64	178	1—8	13 17	2 1	2 2	1,25 1,56	10,80 10,05
АО2-61-8	7,5	220/380 500	28/16,2 12,4	725	86,5	0,81	291/206	150/153	0,4	54/64	178	1—7	20 26	1 1	2 2	1,45 1,3	9,55 9,88
АО2-62-8	10	220/380 500	37,1/21,4 16,3	725	87,5	0,81	291/206	190/193	0,4	54/64	178	1—7	15 20	2 1	2 2	1,2 1,45	11,13 10,85

Электродвигатели 7-го габарита

А2-71-2	30	220/380	97/56	2900	90,0	0,9	343/183	118	0,85	36/28	275	1—12	12	3	2	1,4	16,2
А2-72-2	40	220/380	129/75	2900	90,5	0,9	343/183	153	0,85	36/28	275	1—12	9	3	2	1,62	17,7
А2-71-4	22	220/380	73/42	1460	90,0	0,88	343/214	118	0,7	36/46	283	1—8	15	2	2	1,56	13,3

Продолжение

Тип	Паспортные данные						Конструктивные данные					Обмотка статора					
	P, кВт	U, В	I, А	n об/мин	η, %	$\cos\varphi$	$D_н/D_1$, мм	l_1/l_2, мм	δ, мм	Z_1/Z_2	$Q_п$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эк1}$	m_1	a_1	d_1, мм	G, кг
А2-72-4	30	220/380	99/57	1490	90,5	0,88	343/214	168	0,7	36/46	283	1—8	11	3	2	1,5	15,7
А2-71-6	17	220/380	56/33	970	89,0	0,87	343/245	133	0,5	54/64	210	1—8	14	2	2	1,35	12,6
А2-72-6	22	220/830	74/43	970	89,5	0,87	343/245	168	0,5	54/64	210	1—8	11	2	2	1,56	14,45
А2-71-8	13	220/360	48/28	730	87,5	0,82	343/245	183	0,5	54/64	210	1—7	16	2	2	1,25	11,6
А2-72-8	17	220/360	62/36	730	88,5	0,82	343/245	168	0,5	54/64	210	1—7	13	2	2	1,4	13,12
АО2-71-2 АО2-71-2сх	22	220/380	73/42	2900	88,0	0,90	343/183	133	0,85	36/28	275	1—12	12 и 13	3	2	1,35	16,3
АО2-72-2 АО2-72-2сх	30	220/380	99/57	2900	89,0	0,90	343/183	168	0,85	36,28	275	1—12	9 и 10	3	2	1,56	17,8
АО2-71-4	22	220/380	71/41	1460	90,0	0,90	343/214	168	0,7	36/46	283	1—8	25	2	4	1,2	15,0
АО2-72-4	30	220/360	95/55	1460	91,0	0,91	343/214	208	0,7	36/46	283	1—8	10	3	2	1,56	16,4
АО2-71-6	17	220/380	55/32	970	90,0	0,90	343/245	168	0,5	54/64	210	1—8	12	2	2	1,45	13,8
АО2-72-6	22	220/380	71/41	970	90,5	0,90	343/245	208	0,5	54/64	210	1—8	10	2	2	1,62	15,85
АО2-71-8	13	220/380	46/26	730	89,0	0,84	343/245	168	0,5	54/64	210	1—7	15	2	2	1,3	13,12
АО2-72-8	14	220/380	59,34	730	89,5	0,83	343/245	208	0,5	54/64	210	1—7	11	2	2	1,5	14,3
Электродвигатели 8-го габарита																	
А2-81-2	55	220/380	176/102	2920	91,0	0,9	393/211	146	1,0	36/28	395	1—12	9 и 8	5	2	1,5	25,1
		500	77,5										10 и 11	4		1,5	24,9
А2-82-2	75	220/380	237/137	2920	92,0	0,9	393/211	196	1,0	36/28	395	1—12	6 и 7	6	2	1,56	27,3
		500	104,5										8 и 9	5		1,5	27,6

А2-81-4	40	220/380 500	130/75 57	1470	91,0	0,89	393/247	146	0,9	48/58	331	1—11	17 12	2	4	1,56 1,35	24,7 23,9
АО-82-4	55	220/380 500	176/102 77,5	1470	92,0	0,89	393/247	196	0,9	48/58	331	1—11	13 17	3 2	4	1,45 1,56	27,2 27,4
А2-81-6	30	220/380 500	99/58 43,7	975	90,0	0,88	393/285	146	0,6	72/82	240	1—11	25 33	1	6	1,5 1,25	21,0 19,3
А2-82-6	40	220/380 500	130/75 57	975	91,0	0,89	393/285	196	0,6	72/82	240	1—11	10 13	3	3	1,35 1,16	23,2 22,2
А2-81-8	22	220/380 500	79/46 34,8	730	89,0	0,89	393/285	146	0,6	72/82	240	1—8	21 28	1	4	1,62 1,35	18,3 16,9
А2-82-8	30	220/380 500	104/60 46	730	90,0	0,84	393/285	196	0,6	72/82	240	1—8	8 10 и 11	3 2	2	1,56 1,56	22,2 19,4
А2-81-10	17	220/380 500	67/39 29,5	585	86,5	0,77	393/285	146	0,5	60/74	274	1—6	13 17	2	2	1,56 1,35	16,8 16,5
А2-82-10	22	220/380 500	85/49 37,2	585	88,5	0,77	393/285	196	0,5	60/74	274	1—6	10 13	3 2	2	1,45 1,56	19,4 19,4
АО-2-81-2	40	220/380 500	120/75 57	2940	89,0	0,91	393/211	176	1,0	36/28	395	1—12	8 и 9 11	5 4	2	1,5 1,45	26,6 25,7
АО2-82-2	55	220/380 500	173/100 76,6	2490	90,0	0,92	393/211	216	1,0	36/28	395	1—12	7 8 и 9	5 4	2	1,62 1,62	27,4 28,2
АО2-81-4	40	220/380 500	126/73 55,5	1460	91,5	0,91	393/247	196	0,9	48/58	331	1—11	15 10	2 3	4 2	1,62 1,62	26,1 26,1
АО2-82-4	55	220/380 500	170/98 74,5	1460	92,5	0,92	393/247	266	0,9	48/58	331	1—11 1—10	11 15 и 14	3 2	4	1,56 1,62	30,4 28,9

Продолжение

Тип	Паспортные данные						Конструктивные данные					Обмотка статора					
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	$\cos\varphi$	$D_{н1}/D_i$, мм	l_1/l_δ, мм	δ, мм	Z_1/Z_2	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эк1}$	n_1	a_1	d_1, мм	G, кг
АО2-81-6	30	220/380 500	95/55 41,8	980	91,0	0,91	393/285	196	0,6	72,82	240	1—11	7 14	3 2	2 3	1,62 1,4	23,3 23,2
АО2-82-6	40	220/380 500	126/73 55,5	980	91,5	0,91	393/285	266	0,6	72/82	240	1—11 1—10	8 10 и 11	3 2	3	1,5 1,62	26,7 27,2
АО2-81-8	22	220/360 500	75/43 33	730	90,5	0,85	393/285	196	0,6	72/82	240	1—8 1—8	9 23	3 1	2 4	1,4 1,5	20,2 19,7
АО2-82-8	30	220/380 500	98/57 43,2	730	91,0	0,88	393/285	266	0,6	72/82	240	1—8	7 9	3	2	1,63 1,4	24,9 23,9
АО2-81-10	17	220/380 500	64/37 28,3	585	88,0	0,79	393/285	196	0,5	60/74	274	1—6	11 14	3 2	2	1,35 1,45	18,55 18,1
АО2-82-10	22	220/360 500	81/47 36	585	89,5	0,79	393/285	251	0,5	60/74	274	1—6	21 28 и 27	2 1	5	1,2 1,5	21,4 21,9
Электродвигатели 9-го габарита																	
А2-91-2	100	220/380 500	314/181 137	2960	93,0	0,9	458/247	176	1,2	48/40	410	1—16	4 и 5 6	9 7	2	1,62 1,56	42,7 41,1
А2-92-2	125	220/380 500	387/224 170,5	2960	94,0	0,9	458/247	221	1,2	48/40	410	1—16	3 и 4 4 и 5	11 9	2	1,62 1,56	44 43

A2-91-4	75	220/380 500	237/137 104,5	1480	93,0	0,89	458/290	176	1,0	60/70	372	1—13	10 13	4 3	4	1,5 1,5	39 38
A2-92-4	100	220/380 500	312/180 137	1480	93,5	0,9	458/290	221	1,0	60/70	372	1—13	8 11	5 3	4	1,56 1,62	45,6 44,6
A2-91-6	55	220/380 500	176/102 77,5	980	92,0	0,89	458/334	176	0,7	72/66	278	1—11	17 22	2	6	1,4 1,2	29,5 28
A2-92-6	75	220/380 500	258/138 105	980	92,5	0,89	458/334	246	0,7	72/66	278	1—11	6 8	5 4	3	1,5 1,45	34,6 34,6
A2-91-8	40	220/380 500	137/79 60	735	91,5	0,84	458/334	176	0,7	72/66	278	1—8	14 18	2	4	1,56 1,35	25,9 25,0
A2-92-8	55	220/380 500	180/104 79,3	735	92,0	0,87	458/334	246	0,7	72/86	278	1—8	11 14 и 15	3	4	1,4 1,2	29,2 28,2
A2-91-10	30	220/380 500	109/63 47,8	585	90,5	0,8	458/334	176	0,6	60/74	286	1—6	9 12	3	2	1,62 1,35	21,5 19,9
A2-92-10	40	220/380 500	145/84 63,7	585	90,5	0,8	458/334	221	0,6	60/74	286	1—6	7 9	4 3	2	1,56 1,56	23,3 22,4
АО2-91-2	75	220/380 500	238/138 104	2960	90,0	0,92	458/247	221	1,2	48/40	410	1—16	5 6 и 7	8 7	2	1,62 1,5	45,7 44,6
АО2-92-2	100	220/380 500	311/180 137	2960	91,5	0,92	458/247	276	1,2	48/40	410	1—16	4 5	10 9	2	1,62 1,5	49,6 48,0
АО2-91-4	75	220/380 500	232/134 101,5	1470	92,5	0,92	458/290	246	1,0	60/70	372	1—13	9 12	4 3	4	1,62 1,62	46,2 46,2
АО2-92-4	100	220/380 500	306/177 134,8	1470	93,0	0,92	458/290	336	1,0	60/70	372	1—13	7 9	5 4	4	1,62 1,56	52,0 49,6
АО2-91-6	55	220/380 500	171/99 75	980	92,5	0,92	458/334	246	0,7	72/66	278	1—11	7 10	4 3	3	1,5 1,4	32,3 30,2

Продолжение

Тип	Паспортные данные						Конструктивные данные					Обмотка статора					
	P, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	η, %	$\cos\varphi$	$D_{н1}/D_1$, мм	l_1/l_2, мм	δ, мм	Z_1/Z_2	$Q_{п1}$, мм²	$y_{п1}$	$w_{эк1}$	m_1	a_1	d_1, мм	G, кг
АО2-92-6	75	220/380 500	232/134 101,5	980	92,5	0,92	458/334	336	0,7	72/86	278	1—11 1—10	11 14 и 15	3 2	6	1,4 1,5	39,0 39,4
АО2-91-8	40	220/380 500	130/75 57	735	91,5	0,88	458/334	246	0,7	72/86	278	1—8	12 15 и 16	2	4	1,62 1,4	28,4 27,4
АО2-92-8	55	220/380 500	174/101 76,5	735	92,5	0,90	458/334	336	0,7	72/86	278	1—8	9 12	3 2	4	1,56 1,62	35,6 34,0
АО2-91-10	30	220/380 500	107/62 47,0	585	90,0	0,82	458/334	276	0,6	60/74	286	1—6	8 10 и 11	4 3	2	1,45 1,45	23,0 22,6
АО2-92-10	40	220/380 500	142/82 62,2	585	90,5	0,82	458/334	336	0,6	60/74	286	1 - 6	6 8	5 4	2	1,5 1,45	26,2 26,1

Примечание. Обозначение величин в таблице: P — номинальная мощность на валу; U — номинальное линейное напряжение; I — номинальный линейный ток; n — частота вращения; η — номинальный коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке; $\cos\varphi$ — номинальный коэффициент мощности; $D_{н1}$ — наружный диаметр активной стали статора; D_1 — внутренний диаметр активной стали статора; l_1 — полная длина сердечника статора (включая радиальные вентиляционные каналы); l_2 — полная длина сердечника ротора; δ — воздушный зазор; Z_1 — число пазов статора; Z_2 — число пазов ротора; $Q_{п1}$ — площадь сечения паза статора; $y_{п1}$ — шаг обмотки статора по пазам; $w_{эк1}$ — число эффективных витков в катушке; m_1 — число параллельных проводов в витке обмотки статора; a_1 — число параллельных ветвей в фазе обмотки статора; d_1 — диаметр неизолированного элементарного проводника обмотки статора; G — масса провода обмотки статора с изоляцией.

Электродвигатели серии выпускаются в брызгозащищенном исполнении (типы А2) и закрытом обдуваемом исполнении (типы АО2) В указанном диапазоне мощности серия состоит из девяти габаритов (1 9-й), отличающихся диаметром сердечника статора. Каждый габарит имеет две длины сердечника статора и таким образом серия имеет восемнадцать типоразмеров Шкала мощностей состоит из ступеней: 0,6—0,8—1,1—1,5—2,2—3,0—4,0 - 5,5—7,5-10—13-17 22-30 40—55 75 и 100 кВт. Шкала мощности твердая; мощности электродвигателей на различные частоты вращения (3000, 1500, 1000 и 750 об/мин) одни и те же и соответствуют приведенному выше ряду.

Типы электродвигателей, входящих в серию, имеют буквенно-цифровое обозначение, например АО2—64—4, которое расшифровывается следующим образом: А — асинхронный, О — обдуваемый, первая цифра после букв - номер серии, вторая цифра — порядковый номер габарита, третья цифра — порядковый номер длины сердечника, четвертая цифра — число полюсов

Электродвигатели А2 и АО2 изготовляются с чугунной станиной. Электродвигатели 1, 2 и 3 габаритов выполняются, кроме того, со станиной из алюминиевого сплава (обозначение АОЛ2).

Обмоточные данные электродвигателей единой серии А2, АО2 и АОЛ2, а также их специализированных исполнений для сельского хозяйства (имеющих в конце обозначения дополнительные буквы «сх») приведены в таблице 2.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Исходным элементом обмотки является катушка, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Витком называется элемент из двух последовательно соединенных между собой проводников, расположенных под соседними разноименными полюсами. Проводники, образующие виток, могут быть подразделены на несколько параллельных проводов. К подразделению витка прибегают для удобства намотки во избежание применения грубого провода большого сечения.

Части катушки, лежащие в пазах активной стали, называются пазовыми или активными частями катушки, так как они непосредственно участвуют в создании э.д.с. Проводники, лежащие вне пазовой части и служащие для соединения между собой активных частей катушки, называются лобовыми частями катушки.

Катушка характеризуется также шагом, т. е. числом пазовых делений, заключенных между центрами пазов, в которые закладывают стороны катушки.

Шаг катушки $y_п$ называют диаметральным, если он равен полюсному делению. В этом случае, например, для статора

$$y_{п1}-\tau_1=Z_1/(2p),$$

где Z_1 — число пазов статора;
$2p$ — число полюсов обмотки.

Полюсное деление представляет длину части окружности расточки статора, приходящейся на долю одного полюса, см:

$$\tau_1=\pi D_1/(2p),$$

---

* В настоящем разделе схемам обмоток уделено внимание лишь в той степени, в какой они влияют на расчет обмотки

где D_1 диаметр расточки статора, см *.

В двухполюсной электрической машине центральный угол, соответствующий полюсному делению, составляет 180°, в четырехполюсной 90°, в шестиполюсной — 60° и т д.

При составлении схем обмоток принято при любом числе полюсов электродвигателя считать угол, соответствующий полюсному делению, равным 180 эл град.

Тогда число электрических градусов в окружности расточки электрической машины с любым числом полюсов будет равно $180 \cdot 2p$.

Шаг катушки может быть несколько меньше диаметрального, в этом случае его называют укороченным.

Укорочение шага катушки (обмотки) характеризуется **коэффициентом укорочения**

$$\beta_1 - y_{п1}/\tau_1,$$

где $y_{п1}$ — укороченный шаг обмотки статора.

Несмотря на то, что укорочение шага влечет за собой уменьшение э.д.с. в катушке (обе стороны витка при укороченном шаге не могут одновременно находиться под центрами соседних полюсов), оно широко применяется в двухслойных обмотках электрических машин переменного тока, так как не только экономится медь на длине лобовых частей, но и улучшаются электрические свойства электродвигателя, облегчается укладка катушек в пазы.

В обмотках различных типов, исходя из условий электромагнитного расчета и технологических соображений, применяют укорочение шага обычно 0,85 -0,75, реже до 0,66 (в отдельных случаях и до 0,5).

Характерным показателем обмотки электродвигателя является q — **число пазов на полюс и фазу**. Это число показывает, сколько катушечных сторон каждой фазы приходится на один полюс обмотки. Поскольку катушечные стороны одной фазы, лежащие под двумя соседними полюсами обмотки, образуют катушечную группу, число q показывает, из скольких катушек состоят катушечные группы данной обмотки.

* К обозначениям, относящимся к статору, прибавляется индекс 1 (например, число пазов статора обозначается Z_1); к обозначениям, относящимся к ротору, прибавляется индекс 2 (например, число пазов ротора обозначается Z_2)

Таким образом, для статора

$$q_1 = Z_1/(2pm),$$

где m — число фаз обмотки

Для рассматриваемых нами трехфазных обмоток

$$q_1 = Z_1/(6p).$$

Если, к примеру, $Z_1 = 60$, а $2p = 4$,

$$q_1 = Z_1/(6p) = 60/(6 \cdot 2) = 5.$$

Если же статор этой машины использовать для изготовления восьмиполюсной машины, то $q_1 = 60/(6 \cdot 4) = 2{,}5$, т. е. число пазов на полюс и фазу будет дробным.

Дробное q_1, так же как и целое, определяет количество катушек в каждой катушечной группе. Так как число катушек в катушечной группе может быть только целым числом, то дробное q_1 может быть реализовано только как среднее значение (т. е. половина катушечных групп должна состоять из двух и половина — из трех катушек).

Из условий симметрии обмотки следует, что во всех трех ее фазах должно быть одинаковое число катушек, симметрично расположенных по окружности стального сердечника. Именно в этом случае суммарные э.д.с. фаз обмотки будут равны по величине и сдвинуты одна относительно другой на 120 или 240°.

Катушки должны быть соединены в катушечные группы, а последние — в фазы так, чтобы соблюсти необходимое количество полюсов обмотки и правильное их чередование.

Катушки внутри катушечной группы соединяют всегда последовательно, а катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно, параллельно или смешанным способом (последовательно-параллельно). Основным правилом при пересоединении последовательной обмотки в параллельную или смешанную является сохранение направления тока в катушечных группах таким же, каким оно было бы при последовательном соединении, в котором направление токов определяется чередованием полюсности обмотки.

На схеме требуется указать способ соединения фаз обмотки — в звезду или в треугольник. Каким из этих способов должны быть соединены фазы, определяют расчетом обмотки

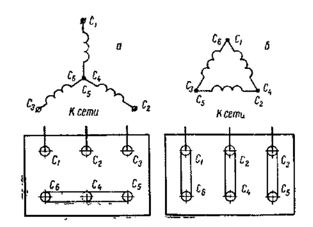


Рис 2 Соединение фаз обмотки электродвигателя напряжением 220/380 В
а — звездой 380 В, б треугольником, 220 В

Для одного и того же номинального напряжения для различных машин можно применять и тот, и другой способы

Само соединение фаз может быть выполнено как внутри двигателя, глухо, так и при помощи перемычек на специальном щитке, вынесенном на корпус. Последний способ удобен тем, что позволяет более четко проводить профилактические испытания обмотки в процессе эксплуатации, так как начала и концы всех фаз могут быть свободно присоединены к испытательной аппаратуре.

Очень часто электродвигатели бывают пригодны для работы на любом из двух номинальных напряжений, находящихся в соотношении 1 : 1,73, например 127 и 220 В, 220 и 380 В или 380 и 660 В; тогда при меньшем из этих двух напряжений его фазы должны быть соединены в треугольник, а при большем — в звезду

На рисунке 2 показаны принципиальные схемы соединения фаз обмотки и соответствующие этим соединениям переключения, производимые на внешнем щитке для асинхронного двигателя на номинальные напряжения 220/380 В.

Обмотки электродвигателей подразделяются на **петлевые и волновые**; петлевые, как правило, используют

для статоров, волновые - для фазовых роторов асинхронных двигателей

Как петлевые, так и волновые обмотки могут быть *однослойными* и *двухслойными*.

При однослойной обмотке каждая сторона катушки занимает весь паз, при двухслойной обмотке сторона катушки занимает по высоте только половину паза, т. е. в каждый паз закладывают две стороны катушки, образуя два слоя обмотки Таким образом, при однослойной обмотке число катушек равно половине числа пазов, а при двухслойной — полному числу пазов.

Основной недостаток однослойных обмоток по сравнению с двухслойными — увеличенный (до 20%) расход меди и ограниченные возможности построения схемы обмотки с укороченным шагом и с дробным q_1 для наиболее распространенного вида однослойных обмоток — концентрических. Эти недостатки однослойных обмоток весьма существенны и ограничивают их применение; однако однослойные обмотки позволяют повысить коэффициент заполнения паза за счет отсутствия значительного изоляционного слоя в середине паза.

Перед тем как перейти непосредственно к рассмотрению схем обмоток, следует установить некоторые буквенные обозначения и приемы изображения схем на чертежах.

Основной чертеж схемы в условном виде представляет собой развертку окружности статора или ротора на плоскости. Пазы и стороны уложенных в них катушек изображают прямыми линиями. Схемы двухслойных обмоток в пазовой части показывают двумя рядом расположенными линиями — сплошной и пунктирной, причем сплошная линия обозначает сторону катушки, уложенную в верхнюю часть паза, а пунктирная линия — нижнюю сторону катушки, уложенную на дно паза. Нижний и верхний слой лобовых частей изображают соответственно пунктирными и сплошными линиями.

Стрелки на элементах обмотки, проставленные на некоторых схемах, показывают направление э.д.с. или токов в соответствующих элементах обмотки в определенный (один и тот же для всех фаз обмотки) момент времени.

Начала и концы фаз обмотки статора по ГОСТ 183—66 обозначают таким образом:

начало 1-й фазы	C_1	конец 1-й фазы	C_4
» 2-й »	C_2	» 2-й »	C_5
» 3-й »	C_3	» 3-й »	C_6

Выводы обмотки ротора:

	При 4 выводах на контактных кольцах	При 3 выводах на контактных кольцах
1-я фаза	P_1	P_1
2-я »	P_2	P_2
3-я »	P_3	P_3
Нулевая точка	0	—

Для составления схем трехфазных обмоток статоров электрических машин переменного тока, помимо указания вида обмотки, должны быть даны определяющие ее параметры:

Z_1 — число пазов; $2p$ — число полюсов; $y_{п1}$ — шаг обмотки по пазам; a_1 — число параллельных ветвей в фазе;

Y — (звезда) или Δ — (треугольник) — способ соединения фаз.

ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ СТАТОРА

Однослойные обмотки подразделяют на **концентрические** и **шаблонные.**

На рисунке 3 представлена трехфазная схема однослойной концентрической обмотки статора для четырехполюсного электродвигателя, число пазов которого $Z_1=36$ и фазы обмотки соединены в звезду.

При составлении схемы руководствуются следующими соображениями:

полюсное деление по пазам

$$\tau_1 - Z_1/(2p) - 36/4 = 9;$$

число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1/(m2p) - 36/(3\cdot 4) = 3.$$

В соответствии с этим первую катушечную группу, состоящую из трех катушек, закладывают левыми сторонами катушек в пазы *1*, *2* и *3*, а правыми сторонами — в пазы *10*, *11* и *12*. Началом первой фазы C_1 принимается вывод из левой стороны катушки, заложенной в паз *1*. Заключенные между сторонами первой катушечной группы пазы *4—9*, а также пазы *13—18* займут катушки двух других фаз. Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет левыми

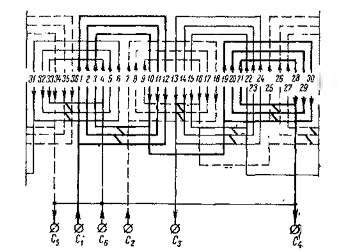


Рис. 3. Схема двухплоскостной концентрической обмотки ($2p=4$; $Z_1=36$).

сторонами катушек пазы *19*, *20* и *21*, правыми сторонами — пазы *28*, *29* и *30*.

Для правильного образования полюсов в однослойных обмотках (кроме обмоток, выполненных в «развалку», о чем будет сказано ниже), т. е. в обмотках, где число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов, группы должны соединяться разноименными концами (конец первой катушечной группы с началом второй, конец второй катушечной группы с началом третьей и т. д.).

Исходя из этого, соединяют концы, выходящие из пазов *10* и *19*. При этом соединении двух катушечных групп оставшийся свободным вывод из правой стороны катушки, заложенной в паз *28*, является выводным концом первой фазы C_4.

Начало второй фазы сдвигают от начала первой фазы обычно на 120 эл. град., т. е. на $^2/_3$ полюсного деления. Здесь же следует отметить, что этот сдвиг может быть выполнен на число электрических градусов, равное $120+360\,n$ или $240+360\,n$, где n — любое целое число, и только в целях концентрации всех выводов на одном участке обмотки они сдвигаются на минимально возможное расстояние — на 120 эл. град.

Начало второй фазы C_2 должно быть сдвинуто на $\frac{2}{3}\tau_1$, т. е на $\frac{2}{3}\times 9=6$ пазов, т. е. располагается в $1+6=7$ пазу.

Следовательно, первая катушечная группа второй фазы займет левыми сторонами катушек пазы *7, 8* и *9*, а правыми сторонами – пазы *16, 17* и *18*. Пазы *19—24* займут катушки других фаз, а вторая катушечная группа второй фазы займет левыми сторонами катушек пазы *25, 26* и *27* и правыми сторонами — пазы *34, 35* и *36*.

Катушечные группы второй фазы соединяют между собой концами катушек, выходящих из пазов *16* и *25*. Оставшийся свободный вывод из правой стороны катушки, заложенной в паз *34*, является выводным концом второй фазы C_5

Начало третьей фазы C_3, сдвинутое от начала второй фазы на $^2/_3$ полюсного деления, располагают в пазу *13*.

В первой катушечной группе третьей фазы левые стороны катушек займут пазы *13, 14* и *15*, а правые стороны — *пазы 22, 23 и 24*. Вторая катушечная группа этой фазы располагается левыми сторонами катушек в пазах *31, 32* и *33* и правыми сторонами - в пазах *4, 5* и *6*. Соединяют между собой катушечные группы концами, выходящими из пазов *22* и *31*. Свободный вывод, выходящий из правой стороны катушки, заложенный в паз *4*, является выводным концом третьей фазы C_6. Для соединения фаз в звезду соединяют выводы C_4, C_5 и C_6

Чтобы проверить правильность образования полюсов, надо указать стрелками направление токов на входных концах фаз C_1, C_2 и C_3.

Как следует из векторной диаграммы фазовых токов трехфазной системы, в любой момент времени направление тока в начале одной из фаз обмотки всегда противоположно направлению токов в началах двух других фаз. Сообразуясь с этим, проставляют на линии пазов стрелки, показывающие направление тока в сторонах катушек, что и определит правильность образования полюсов в обмотке — их число и чередование, а также правильность соединения фаз между собой.

В однослойной концентрической обмотке шаги катушек в катушечной группе разные· в наружной (самой большой) катушке шаг составляет $4q_1—1$, а во внутренней (самой малой) шаг равен $2q_1+1$.

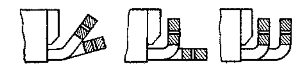


Рис 4 Расположение лобовых частей двухплоскостной концентрической обмотки.

Средний же шаг всех катушек, входящих в катушечную группу, который является расчетным при определении э д с обмотки, равен:

$$[(4q_1-1)+(2q_1+1)]/2=3q_1=Z_1/(2p),$$

т е. является диаметральным.

По способу расположения лобовых частей обмотку, изображенную на рисунке 3, называют **двухплоскостной** (двухъярусной), так как в ней лобовые части расположены в двух плоскостях, взаиморасположение лобовых частей которых указано на рисунке 4.

В однослойной обмотке число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов p; следовательно, число катушечных групп всей обмотки будет $3p$, т. е. $3p/2$ малых (первой плоскости) катушечных групп и $3p/2$ больших (второй плоскости) катушечных групп. Число $3p/2$ может быть целым тогда, когда p четное, т. е. когда число полюсов обмотки $2p$ — 4, 8, 12, 16 и т. д. Это значит, что только при числе полюсов из указанного ряда вся двухплоскостная обмотка может быть распределена на три фазы с равным числом больших и малых катушечных групп в каждой фазе, как это было в обмотке, показанной на рисунке 3, или в обмотке, приведенной для восьмиполюсного двигателя (рис. 5)

Когда число пар полюсов нечетное ($2p$=6, 10, 14, 18 и т д.), двухплоскостная обмотка не может быть распределена по фазам с одинаковым числом больших и малых катушечных групп. Она должна иметь так называемую «переходную» катушечную группу, как бы наполовину находящуюся в первой плоскости, наполовину — во второй. Схема такой обмотки для шестиполюсной машины приведена на рисунке 6.

Если еще раз обратиться к рисункам 3 и 5, легко установить, что обмотка на рисунке 3 имеет последовательное соединение катушечных групп в фазе, а обмотка

на рисунке 5 — соединение в две параллельные ветви (у последних должны быть одинаковые индуктивные и активные сопротивления для обеспечения равенства проходящих по ним токов). Следовательно, обмотка, изображенная на рисунке 3, при соединении в две параллельные ветви имела бы неодинаковые активные сопротивления, так как в одну параллельную ветвь входила бы малая катушечная группа, а в другую — большая с лобовыми частями разной длины и поэтому с разными активными сопротивлениями. Что касается схемы, изображенной на рисунке 5, то здесь в каждую параллельную ветвь входит по одной малой и одной большой катушечной группе, т. е. соблюден принцип одинаковости активных сопротивлений. Если же обмотку соединить в четыре параллельные ветви, этот принцип нарушится, обмотка получится с разными активными сопротивлениями в параллельных ветвях.

Необходимо заметить, что в асинхронных электродвигателях активное сопротивление фазы обмотки составляет обычно не более 10—12% полного сопротивления, которое в основном зависит от индуктивного.

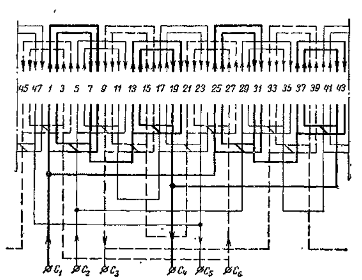


Рис. 5 Схема двухплоскостной концентрической обмотки ($2p=8$, $Z_1=48$, $a_1=2$).

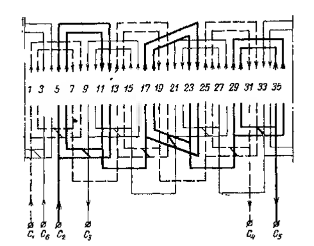


Рис 6 Схема обмотки с переходной катушечной группой ($2p=6$; $Z_1=36$).

И если учесть, что за счет различной длины прямолинейных вылетов большой и малой катушечных групп разница в их активных сопротивлениях будет также порядка 10—12%, то разница в полных сопротивлениях параллельных ветвей (при условии равенства их индуктивных сопротивлений) и, значит, токов в них составит около 1%, что практически не может повлиять на работу электродвигателя. Это положение служит объяснением применения для двухполюсных электродвигателей трехплоскостных обмоток с катушечными группами различной длины в фазах и соответственно различными активными сопротивлениями фаз обмотки (см рис 8)

На рисунке 7 представлена схема обмотки статора четырехполюсного электродвигателя, точно такого же, для которого раньше была составлена схема по рисунку 3. Эти схемы отличаются одна от другой тем, что обмотка на рисунке 7 состоит из одинаковых катушечных групп (отсюда ее название —«равнокатушечная») При соединении этой обмотки в две параллельные ветви не будет разницы в активном сопротивлении параллельных ветвей, и если в обыкновенной однослойной обмотке число видов катушек равно $2q_1$, то в равнокатушечной обмотке оно равно q_1

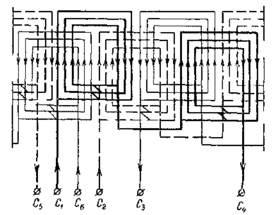


Рис. 7. Схема двухплоскостной концентрической равнокатушечной обмотки ($2p=4$; $Z_1=36$)

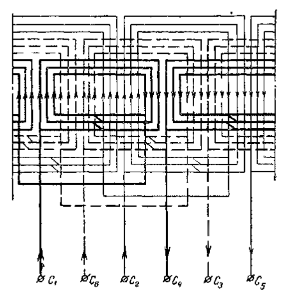


Рис. 8. Схема трехплоскостной концентрической обмотки «вразвалку» ($2p=2$, $Z_1=36$)

На рисунке 8 представлена очень часто применяемая на практике для двухполюсных электродвигателей схема трехплоскостной обмотки статора (лобовые части обмотки располагаются в трех плоскостях) Здесь лобовые части первой фазы обмотки располагаются только в первой плоскости, второй фазы — только во второй и третьей фазы — только в третьей плоскости

Таким образом, как уже говорилось, активные сопротивления фаз в этой обмотке различны. Другой особенностью этой схемы является то, что катушечная группа, состоящая из шести катушек (q_1-6), разбита на две концентрические полугруппы по три катушки в каждой, т. е катушечная группа как бы развалена надвое. Отсюда такую обмотку часто называют намотанной **«вразвалку».**

Способ намотки «вразвалку» дает возможность уменьшить радиальные размеры корпуса электродвигателя за счет небольшого увеличения ее аксиальных размеров, что в общем то приводит к довольно ощутимому снижению общего веса электродвигателя.

Рассмотрев различные типы однослойных концентрических обмоток, можно сформулировать основные положения, которыми следует руководствоваться при составлении схемы обмотки.

1 Исходя из технологических условий заготовки и укладки катушек, а также условий эксплуатации электродвигателя, выбирают тип обмотки (двух- или трехплоскостная, разно- или равнокатушечная).

2. Определяют число катушек в катушечной группе, равное числу q_1

3. Определяют шаг катушек по пазам. Шаг большой (внешней) катушки в катушечной группе равен $4q_1-1$. Например, в обмотке с $q_1=4$ шаг внешней катушки равен 15, или, как принято обозначать, шаг 1—16 Шаг каждой следующей внутренней катушки уменьшается на два пазовых деления, т е. составит 1—14, 1—12 и 1—10.

4 Определяют, можно ли соединить проектируемую обмотку в требуемое число a_1 параллельных ветвей. Для осуществления этого требования необходимо, чтобы частное p/a_1 было целым числом.

5. Расставляют направления токов под полюсами, образованными магнитным полем обмотки, соединяя при помощи междукатушечных соединений отдельные

катушки в катушечные группы и при помощи междугрупповых соединений — катушечные группы в фазы, при этом выбранное направление тока в фазе должно соответствовать стрелкам во всех катушках фазы

6. Выбирают катушки, из которых должны выходить начала и концы фаз обмотки.

Рис 9 Схема простой шаблонной обмотки ($2p=2$, $Z_1=18$ $У_{п1}=9$).

Для проверки правильности определения начал и концов фаз следует воспользоваться правилом о направлении токов в фазах, о котором выше уже упоминалось.

Шаблонные обмотки можно подразделить на простую шаблонную обмотку, шаблонную обмотку «вразвалку» и цепную обмотку.

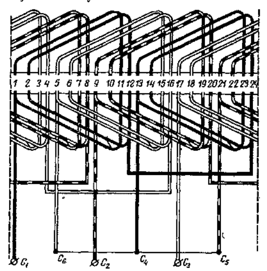


Рис. 10 Схема шаблонной равнокатушечной обмотки «вразвалку» ($2p=2$; $Z_1=24$; $q_1=4$; $y_{п1}=10$).

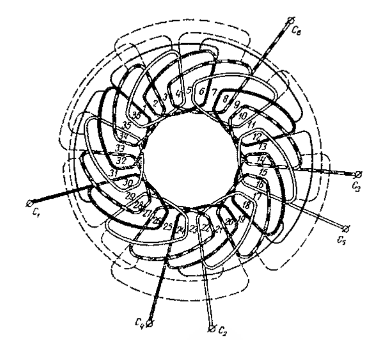


Рис 11 Схема цепной обмотки ($2p$ 6 $Z_1=36$, $q_1=2$, $y_{п1}=5$)

На рисунке 9 приведена полная развернутая схема *простой шаблонной обмотки* двухполюсного электродвигателя при $q_1=3$. Из схемы видно, что катушки шаблонной обмотки (это относится ко всем типам шаблонных обмоток) имеют трапецеидальную форму. Одна пазовая часть катушки — длинная, другая — короткая. Лобовые части катушек при этом располагаются в двух плоскостях.

Образование катушечных групп и фаз обмотки, определение начал и концов фаз выполняется так же, как и в концентрической обмотке. Положительным качеством этой обмотки является то, что все катушки совершенно одинаковы по форме.

Шаблонная обмотка, так же как и концентрическая, может быть выполнена способом «вразвалку». На рисунке 10 изображена схема *шаблонной обмотки «вразвалку»* для двухполюсного электродвигателя при $Z_1=24$.

Схему на рисунке 10 можно рассматривать как промежуточную между шаблонной обмоткой «вразвалку» и так называемой *цепной обмоткой*. Цепные обмотки также выполняют «вразвалку».

От предыдущих обмоток эта отличается тем, что в ней короткие и длинные стороны катушек чередуются, т. е. «развалка» производится не по полугруппам, а по катушкам.

На рисунках 11 и 12 показаны схемы цепных обмоток соответственно для шести- и четырехполюсного электродвигателя. Для наглядности эти схемы представлены в виде кольцевой развертки. Рассматривая их, можно заметить, что короткие стороны катушек лежат в нечетных пазах, длинных — в четных. Но так как каждая катушка состоит из короткой и длинной стороны, то цепную обмотку можно образовать только в том случае, если ее шаг будет нечетным.

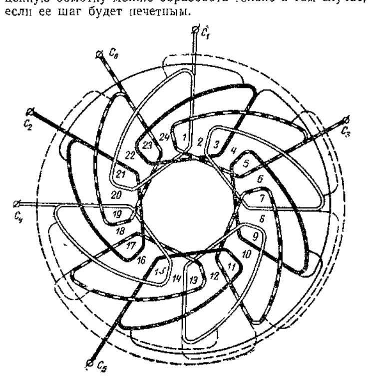


Рис. 12. Схема цепной обмотки ($2p=4$, $Z_1=24$; $q_1=2$; $y_{n1}=5$).

Важно отметить, что обмотки, изображенные на рисунках 11 и 12, выполнены с укороченным шагом катушек по пазам. На этой и другой схеме шаг равен пяти, в то время как диаметральный шаг этих обмоток равен

для рисунка 11 $Z_1/(2p)=36/6=6$,

для рисунка 12 $Z_1/(2p)=24/4=6$.

Таким образом, цепная обмотка может быть выполнена с укороченным шагом, что дает экономию меди в лобовых частях, хотя по электрическим свойствам она эквивалентна обмотке с диаметральным шагом.

СХЕМЫ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК СТАТОРА

Обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу. В статорах электродвигателей переменного тока обмотки чаще всего выполняются двухслойными петлевыми. Все катушки двухслойной обмотки одинаковы, что упрощает и удешевляет их изготовление. Название «двухслойной», как уже об этом упоминалось, обмотка получила потому, что в паз закладываются стороны двух катушек, а каждая катушка располагается на статоре в двух слоях. Один слой обмотки укладывается на дно паза («нижний» слой), а другой — в части паза, прилегающей к расточке статора («верхний» слой). Лобовые части катушки также занимают два слоя, а переход из одного слоя в другой осуществляется в головках катушек.

Преимущества двухслойных петлевых обмоток следующие:

возможность применения катушек с любым укорочением шага, причем шаг катушки может быть как четным, так и нечетным;

сравнительно несложное выполнение обмотки с числом пазов на полюс и фазу q_1 любой дробности;

возможность применения разновитковых катушек для полного использования площади пазов статора, если в результате электромагнитного расчета окажется, что полное число активных проводников в пазу должно быть нечетным.

Эти преимущества двухслойной петлевой обмотки позволяют применять ее для статоров асинхронных электродвигателей.

В качестве примера, пользуясь принятыми нами ранее условными графическими и буквенными обозначе-

ниями, приведем схему двухслойной обмотки со следующими параметрами (рис. 13): $2p=8$; $Z_1=48$; $y_{п1}=5$; $a_1=1$. Так как диаметральный шаг этой обмотки, равный полюсному делению:

$$\tau_1=48/8=6,$$

то коэффициент укорочения обмотки

$$\beta_1=y_{п1}/\tau_1=5/6.$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1=Z_1/(2pm)=48/(8\cdot 3)=2$$

В соответствии с этим 1-ю катушечную группу, состоящую из двух катушек, закладывают верхними сторонами катушек в пазы, условно обозначенные *1* и *2*, нижними сторонами — в пазы *6* и *7*.

Началом (C_1) первой фазы принимают вывод катушки из верха первого паза

Верх пазов *3, 4, 5* и *6* и низ пазов *8, 9, 10* и *11* займут соответственно катушечные группы других двух фаз.

Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет своими верхними сторонами пазы *7* и *8*, а нижними —пазы *12* и *13*

Остальные катушечные группы первой фазы займут верхними сторонами катушек — пазы *13* и *14, 19* и *20, 25* и *26, 31* и *32, 37* и *38, 43* и *44;* нижними сторонами катушек — пазы *18* и *19, 24* и *25, 30* и *31, 36* и *37, 42* и *43, 48* и *1*

Для правильного образования и чередования полюсов катушечные группы при последовательном соединении (в нашем случае $a_1=1$ — соединение последовательное) соединяют между собой одноименными выводами. При соединении таким способом всех катушечных групп первой фазы получится свободный вывод из верха катушки, заложенной в *43*-й паз Этот вывод и является выводным концом первой фазы (C_4).

Начало второй фазы сдвигают от начала первой фазы (если q_1 - целое число) на 120 эл град, или на $^2/_3$ полюсного деления.

Так как полюсное деление $\tau_1=6$, то начало второй фазы сдвигают на $2/3\cdot 6=4$ паза, т. е. располагают в $1+4=5$-м пазу.

Аналогично этому начало третьей фазы располагают в *9*-м пазу.

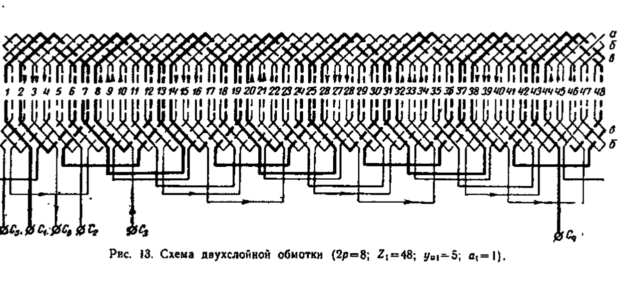


Рис. 13. Схема двухслойной обмотки ($2p=8$; $Z_1=48$; $y_{п1}=5$; $a_1=1$).

Концы второй и третьей фазы также сдвинуты от конца первой фазы на $\frac{2}{3}\tau_1$ и находятся соответственно в *47* и *3* м пазах

Необходимо знать, что в одном пазу каждого полюса (пазы *6, 12, 18* и т. д) есть встречное направление токов в верхней и нижней сторонах катушек, которое происходит вследствие принятого укорочения шага обмотки на один паз (принят шаг, равный пяти, по сравнению с диаметральным шагом, равным шести)

При укорочении на два паза по отношению к диаметральному встречное направление токов будет уже в двух пазах каждого полюса. В этом легко убедиться, если составить схему, отличающуюся от приведенной на рисунке 13 только шагом обмотки *1 5* (вместо *1 6*), и обозначить стрелками направления токов во всех элементах обмотки. При диаметральном шаге обмотки встречных направлений токов в одном и том же пазу не будет.

Мы уже упоминали о том, что в зависимости от расчетных данных катушечные группы в фазе могут быть соединены между собой последовательно или параллельно (в две или несколько параллельных ветвей).

На рисунке 14 приведена схема обмотки с параметрами, аналогичными обмотке, показанной на рисунке 13, но при соединении катушечных групп в две параллельные ветви (a_1-2).

Возможное число параллельных ветвей a_1 обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу определяется требованием, по которому отношение $2p/a_1$ должно выражаться целым числом, так как указанное отношение равно числу катушечных групп, приходящихся на каждую параллельную ветвь, а это число, естественно, не может быть дробным. Отсюда следует, что число параллельных ветвей может быть равно 1; 2; p и $2p$ при любом числе полюсов машины.

Число параллельных ветвей может быть равно $p/2$, $p/3$, $p/4$, p/n только в обмотках, число полюсов которых делится соответственно на 4, 6, 8, ..., $2n$, т е число параллельных ветвей может быть равно:

$p/2$	для обмоток, имеющих	4, 8, 12, 16 полюсов и т д.
$p/3$	» » »	6, 12, 18, 24 полюса
$p/4$	» » »	8, 16, 24, 32 »
$p/5$	» » »	10, 20, 30, 40 полюсов
$p/6$	» » »	12, 24, 36, 48 »

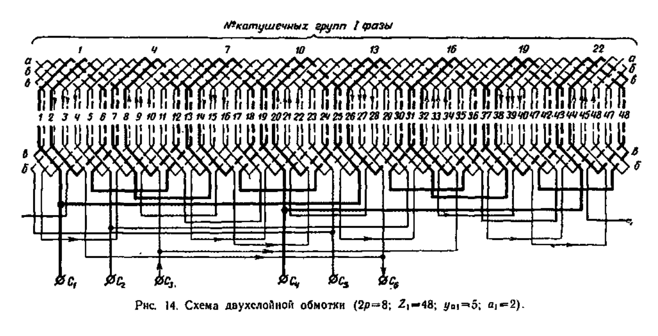


Рис. 14. Схема двухслойной обмотки ($2p=8$; $Z_1=48$; $y_{п1}=5$; $a_1=2$).

Обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу. Выше упоминалось, что одним из свойств двухслойных обмоток является возможность выполнения их с q_1 числом пазов на полюс и фазу любой дробности

В асинхронных двигателях следует избегать обмоток с дробным q_1 и лишь в крайнем случае применять их, но с q_1, имеющим знаменатель, равный двум. Тем не менее электромашиностроительные заводы довольно часто выполняют обмотки с дробным q_1, так как это позволяет использовать одни и те же штампы для вырубки листов стали для различных типоисполнений электродвигателей.

При ремонте электродвигателей приходится сталкиваться с обмотками, у которых q_1 дробное. Представим себе такой случай. Асинхронный электродвигатель с параметрами обмотки статора $Z_1=72$; $2p=12$; $a_1=1$ модернизируется при ремонте с увеличением мощности за счет повышения его номинальной частоты вращения (синхронной) с $n_c=500$ об/мин $(2p=12)$ до $n_c=600$ об/мин $(2p=10)$.

До модернизации $q_1=Z_1/(3\cdot 2p)=72/(3\cdot 12)=2$,

после модернизации $q_1=72/(3\cdot 10)=2\frac{2}{5}$

Как указывалось, число q_1 определяет число катушек в катушечной группе Дробное q_1 означает, что в обмотке не все катушечные группы одинаковы. Одни из них состоят из большего числа катушек и называются большими катушечными группами, другие — с меньшим число катушек, называются малыми

В общем случае дробное число пазов на полюс и фазу представляется в виде целого числа и правильной дроби:

$$q_1=b+c/d.$$

Для нашего примера $b=2$, $c=2$, $d=5$.

При составлении схемы часть катушечных групп комплектуется из «$b+1$» катушек (большие катушечные группы), а часть из «b» катушек (малые катушечные группы). Количество больших и малых катушечных групп в каждой фазе, а следовательно, и во всей обмотке определяется дробной частью (c/d) числа q_1. В применении к выбранному нами примеру на каждые $d=5$ катушечных групп во всей обмотке (также и в фазе) приходится $c=2$ больших катушечных групп, состоящих

из $b+1=3$ катушек и $d-c=3$ малых катушечных групп, состоящих из $b=2$ катушек.

Для выполнения схемы обмоток остается только определить порядок чередования больших и малых катушечных групп по окружности статора.

Так как на каждые d катушечных групп по всей окружности статора будет приходиться c и $d-c$ соответственно больших и малых, то первые d катушечных групп называют периодом чередования и записывают (по данным нашего примера): (2 3 2 3 2), или в любом другом распределении: (2 2 2 3 3), (2 3 3 2 2), (3 2 2 2 3) и т. д.

Выбрав какое-либо распределение для периода чередования, повторяют его столько раз, сколько раз число d содержится в полном количестве катушечных групп всей обмотки, т. е. $3 \cdot 2p/d$ раз. Для выбранного нами примера период чередования повторяется $3 \cdot 10/5=6$ раз, и полное чередование катушечных групп по окружности статора примет вид:

(2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2),

(2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2).

Практически для полной характеристики чередования катушечных групп всей обмотки достаточно записать (2 3 2 3 2) и т. д.

На рисунке 15 приведена схема соединений обмотки с $q_1=1\frac{1}{2}$, в которой группы из двух и одной катушек чередуются между собой.

Распределение больших и малых катушечных групп внутри периода чередования может быть совершенно произвольным. Любое из приведенных выше в нашем примере распределений обеспечивает правильное выполнение схемы обмотки. Практически принято распределять большие и малые катушечные группы внутри периода чередования по возможности равномерно.

Исходя из этого положения, рекомендуем наиболее простой, проверенный практикой, способ определения чередований для двухслойных петлевых обмоток с числом q_1 любой дробности. Так, например, требуется составить чередование катушечных групп по окружности статора при $q=2\frac{3}{10}$. По виду дроби определяем, что чередование

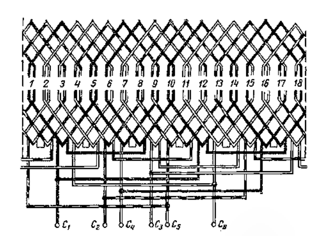


Рис. 15. Схема двухслойной обмотки ($2p=4$, $Z_1=18$, $q_1=1\frac{1}{2}$)

будет состоять из 7 двухкатушечных и 3 трехкатушечных групп. Выписываем строчку из 7 двоек

$$\begin{matrix}22 & & 22 & & 22 & & 2\\ & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & \end{matrix}$$

Стараясь по возможности равномерно распределить большие и малые катушечные группы, в указанные стрелками промежутки вставляем тройки; получаем законченное чередование

(2 2 3 2 2 3 2 2 3 2).

Если $q_1=2\frac{7}{10}$, то трехкатушечных групп будет больше, чем двухкатушечных, поэтому первую строчку составляем из семи троек, а между ними расставляем двойки.

Проверить приемлемость выбранного распределения катушечных групп внутри периода чередования требуется лишь в том случае, если в составляемой схеме необходимо выполнить параллельные ветви.

Число возможных параллельных ветвей в двухслойных петлевых обмотках с дробным q_1 определяется из соотношения:

$$2p/(a_1 d)=\text{целому числу}.$$

Все сказанное выше о трехфазных обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу справедливо для всех значений q_1, кроме тех, когда знаменатель дробности d равен или кратен 3. В этом последнем случае получается так называемая несимметричная трехфазная обмотка, где фазные напряжения не одинаковы по величине и сдвинуты друг относительно друга на угол, не точно равный 120 или 240°.

СХЕМЫ ОБМОТОК ФАЗОВЫХ РОТОРОВ

В фазовых роторах асинхронных электродвигателей применяют преимущественно волновые обмотки с двумя стержнями в пазу, уложенными в два слоя. Эти обмотки обычно выполняют с целым числом пазов на полюс и фазу q_2, диаметральным шагом, равным полюсному делению τ_2 (за исключением так называемых переходных шагов), и одной ветвью в фазе $a_2=1$. Иногда применяют волновые обмотки с дробным q_2, но в этом случае знаменатель дробности равен двум. Обмотки с другим показателем дробности встречаются редко и здесь не рассматриваются

Роторы с обмотками, имеющими дробное q_2, выпускаются электромашиностроительными заводами в том случае, если необходимо использовать один и тот же штамп для вырубки листов для электродвигателей с разным числом полюсов; например, при использовании штампа двухполюсного электродвигателя, у которого q_2 равно 5, для четырехполюсного электродвигателя, у которого в этом случае q_2 равно 2,5.

На рисунке 16 представлена схема соединения обмотки $Z_2=36$; $2p=4$ и $q_2=3$. Для наглядности приведена схема соединений только для одной первой фазы.

Порядок составления схемы следующий: на чертеже развертки пазов ротора отмечают группы пазов, относящихся к первой фазе При этом руководствуются тем, что каждая из групп содержит q_2 пазов (в нашем случае 3 паза) и между группами заключается $2q_2$, т. е. 6 пазов Естественно, что число таких групп равно числу полюсов $2p=4$.

За первый паз удобней принять крайний правый в какой-нибудь из указанных групп. Таким образом, четыре группы составятся из пазов: *35, 36* и *1; 8, 9* и *10; 17, 18* и *19; 26, 27* и *28.*

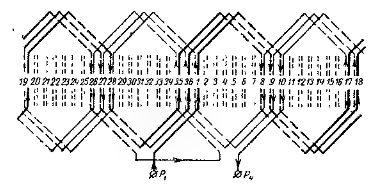


Рис. 16. Схема стержневой волновой обмотки ротора ($2p=4$, $Z_2=36$; $q_2=3$).

Верхний стержень паза *1* принимают за начало первой фазы (P_1). Затем q_2 раз (в нашем случае 3 раза) обходят окружность ротора в направлении, определяемом стрелкой на вводе P_1, сделав при каждом обходе $2p-1$ (3) диаметральных шага и один последний шаг, укороченный на один паз.

Следует отметить, что если бы последний шаг (называемый переходным) не был укорочен, то обмотка замкнулась бы на себя. Этого замыкания обмотки так же можно избежать, если переходный шаг не укоротить, а удлинить на один паз, т. е. применить удлиненный переходной шаг. Обмотка с удлиненным переходным шагом менее конструктивна, лобовые части ее в местах, соответствующих переходам, имеют большие вылеты по сравнению с другими лобовыми частями. Однако некоторыми заводами применяются роторные обмотки с удлиненным шагом. При ремонте таких обмоток увеличивается возможность использования старой меди стержней путем перевода обмотки на укороченный шаг.

В рассматриваемой схеме первые три обхода займут пазы

первый обход *1* верх - *10* низ - *19* верх *28* низ,
второй обход *36* верх — *9* низ *18* верх *27* низ,
третий обход *35* верх - *8* низ - *17* верх — *26* низ.

После $q_2=3$ обходов занятыми оказались только половина пазов первой фазы. Для того чтобы занять вторую половину пазов, обеспечив при этом правильное

образование полюсов, делают еще такое же количество обходов, но в противоположном направлении. Эти обходы начинают с нижнего стержня паза *35* (паз является левым в группе пазов, с которой была начата обмотка), а между стержнями в пазах *26* и *35* (в общем случае между пазами Z_2+2-4q_2 и Z_2+2-q_2) устанавливают перемычку. Последующие обходы займут пазы:

четвертый обход *35* низ—*26* верх—*17* низ - *8* верх,
пятый обход *36* низ—*27* верх—*18* низ— *9* верх,
шестой обход *1* низ -*28* верх—*19* низ —*10* верх.

Верхний стержень 10-го паза явится выводным концом первой фазы (P_4) Применяется и довольно распространен другой вариант второй группы обходов, при котором за начало обхода принимают нижний стержень паза *17* (паза Z_2+2-7q_2).

Порядок обходов при этом варианте:

четвертый обход *17* низ— *8* верх -*35* низ -*26* верх,
пятый обход *18* низ - *9* верх -*36* низ -*27* верх,
шестой обход *19* низ -*10* верх - *1* низ—*28* верх

Верхний стержень *28*-го паза явится концом первой фазы (P_4). По своим электрическим показателям первый и второй варианты обходов идентичны.

Во избежание небаланса при вращении ротора начала двух других фаз располагают симметрично по окружности ротора, сдвигая их по отношению друг к другу на 120 геометрических градусов. При этом, естественно, должна быть соблюдена также электрическая симметрия, условием которой является сдвиг начал фаз на $120+n\cdot360$ или $240+n\cdot360°$ (эл град).

Так как вся рассматриваемая обмотка содержит 720° (эл. град), то симметричное расположение по окружности начал фаз соответствует 240°, что удовлетворяет условиям симметрии

Следует указать, что при числе полюсов, кратном трем, электрически симметричная обмотка невыполнима при сдвиге начал фаз на 120 геометрических градусов, вследствие чего ротор обычно нуждается в уравновешивании балансировочными грузами. В этих случаях, для более равномерного распределения начал фаз их располагают со сдвигом между собой на $4q_2n$ пазов, где n — любое число, чаще всего равное единице

В рассматриваемой же нами обмотке, располагая начало второй фазы (P_2) и третьей фазы (P_3) симмет-

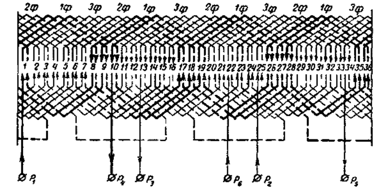


Рис. 17 Схема обмотки ротора с укороченными переходами ($2p=4$; $Z_2=36$, $q_2=3$).

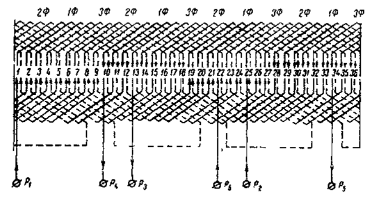


Рис. 18. Схема обмотки ротора с удлиненными переходами ($2p=4$; $Z_2=36$; $q_2=3$).

рично по окружности в пазах *25* и *13* и производя обходы пазов каждый из этих фаз в том же порядке и с теми же шагами, как это было выполнено для первой фазы, получаем схему всей обмотки, изображенную на рисунке 17. Схема обмотки с аналогичными параметрами, но с удлиненным переходным шагом показана на рисунке 18.

Как говорилось, иногда применяют обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, с показателем дроб-

Таблица 3

Число полюсов	Число пазов	Число пазов на полюс и фазу	Шаги: задний	Шаги: передний	Шаги: переходной	Номера верхних стержней начал фаз: I	II	III	Номера нижних стержней для перемычек в фазах: I	II	III	Номера нижних стержней концов фаз: I	II	III
4	18	1,5	4	5	4	1	7	13	13,18	1,6	7,12	5	11	17
4	24	2,0	6	6	5	1	19	17	18,24	2,8	10,16	7	15	23
4	30	2,5	7	8	7	1	11	21	21,29	1,9	11,19	8	18	28
4	36	3,0	9	9	8	1	13	25	26,35	2,11	14,23	10	22	34
4	42	3,5	10	11	10	1	15	29	29,40	1,12	15,26	11	25	39
4	48	4.0	12	12	11	1	17	33	34,46	2,14	18,30	13	29	45
4	54	4,5	13	14	13	1	19	37	37,51	1,15	19,33	14	32	50
4	60	5,0	15	15	14	1	21	41	42,57	2,17	22,37	16	36	56
4	66	5,5	16	17	16	1	23	45	45,62	1,18	23,40	17	39	61
4	72	6,0	18	18	17	1	25	49	50,68	2,20	28,44	19	43	67
4	84	7,0	21	21	20	1	29	57	58,79	2,23	30,51	22	50	78
4	96	8,0	24	24	23	1	33	65	66,90	2,26	34,56	25	57	89
6	27	1,5	4	5	4	1	7	22	22,27	1,6	16,21	5	11	26
6	36	2,0	6	6	5	1	9	29	30,36	2,8	22,28	7	15	35
6	45	2,5	7	8	7	1	11	36	36,44	1,9	26,34	8	18	43
6	54	3,0	9	9	8	1	13	43	44,53	2,11	32,41	10	22	52
6	62	3,5	10	11	10	1	15	50	50,61	1,12	36,47	11	25	60
6	72	4,0	12	12	11	1	17	57	58,70	2,14	42,54	13	29	69
6	81	4,5	13	14	13	1	19	64	64,78	1,15	46,60	14	32	77
6	90	5,0	15	15	14	1	21	71	72,87	2,17	52,67	16	36	86
6	99	5,5	16	17	16	1	23	78	78,95	1,18	56,73	17	39	94
6	108	6,0	18	18	17	1	25	85	86,104	2,20	62,80	19	43	103
6	126	7,0	21	21	20	1	29	99	100,121	2,23	72,93	22	50	120
6	144	8,0	24	24	23	1	33	113	114,138	2,26	82,106	25	57	137
8	36	1,5	4	5	4	1	13	25	31,36	7,12	19,24	5	17	29

8	48	2,0	6	6	5	1	17	33	42,48	10,16	26,32	7	23	39
8	60	2,5	7	8	7	1	21	41	51,59	11,19	31,39	8	28	48
8	72	3,0	9	9	8	1	25	49	62,71	14,23	38,47	10	34	58
8	84	3,5	10	11	10	1	29	57	71,82	15,26	43,54	11	39	67
8	96	4,0	12	12	11	1	33	65	82,94	18,30	50,62	13	45	77
8	108	4,5	13	14	13	1	37	73	91,105	19,33	55,69	14	50	86
8	120	5,0	15	15	14	1	41	81	102,117	22,37	62,77	16	56	96
8	132	5,5	16	17	16	1	45	89	111,128	23,40	67,84	17	61	105
8	144	6,0	18	18	17	1	49	97	122,140	26,44	74,92	19	67	115
8	168	7,0	21	21	20	1	57	113	142,163	30,51	86,107	22	78	134
8	192	8,0	24	24	24	1	65	129	162,186	34,58	98,122	25	89	153
10	45	1,6	4	5	4	1	16	31	40,45	10,15	25,30	5	20	35
10	60	2,0	6	6	5	1	21	41	54,60	14,20	34,40	7	27	47
10	75	2,5	7	8	7	1	26	51	66,74	16,24	41,49	8	33	58
10	90	3,0	9	9	8	1	31	61	80,89	20,29	50,59	10	40	70
10	105	3,5	10	11	10	1	36	71	92,103	22,33	57,68	11	46	81
10	120	4,0	12	12	11	1	41	81	106,118	26,38	66,78	13	53	93
10	135	4,5	13	14	13	1	48	91	118,132	28,42	73,87	14	[illegible]	104
10	150	5,0	15	15	14	1	51	101	132,147	32,47	82,97	16	66	116
10	165	5,5	16	17	16	1	56	111	144,161	34,51	69,106	17	72	127
12	54	1,5	4	5	4	1	16	40	49,54	10,15	34,39	5	20	44
12	72	2,0	6	6	5	1	21	53	66,72	14,20	46,52	7	27	59
12	90	2,5	7	8	7	1	26	66	81,89	16,24	56,64	8	33	73
12	108	3,0	9	9	8	1	31	79	98,107	20,29	68,77	10	40	88
12	126	3,5	10	10	10	1	36	92	113,124	22,33	78,89	11	46	102
12	144	4,0	12	12	11	1	41	105	130,142	26,38	90,102	13	53-	117
12	162	4,5	13	14	13	1	46	118	145,159	28,42	100,114	14	59	131

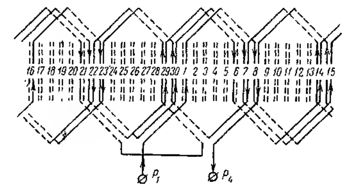


Рис. 19 Схема обмотки ротора с дробным числом пазов на полюс и фазу ($2p=4$; $Z_2=30$, $q_2=2^1/_2$).

ности $\frac{1}{2}$. При $q_2=b+\frac{1}{2}$, где b — целое число, количество пазов, приходящихся на один полюс, составляет $3b+1\frac{1}{2}$, что также не является целым числом и поэтому шаг обмотки не может быть диаметральным. Вследствие этого такие обмотки выполняют с разными шагами с передней и задней сторон ротора. Обычно с передней стороны ротора принимают шаги $3b+1$, а с задней — $3b+2$.

При обходе ротора указанными шагами, чтобы не замкнуть обмотку на себя, последний шаг обхода с передней стороны делают укороченным на один паз, аналогично тому, как это применялось в обмотках с целым числом пазов на полюс и фазу. Число обходов в первой половине обмотки отличается от числа обходов во второй половине обмотки на единицу. Схема обмотки (одной фазы) для электродвигателя с параметрами $Z_2=30$; $2p=4$ и $q=2\frac{1}{2}$ представлены на рисунке 19.

В некоторых случаях в обмотке применяют комбинирование укороченного и удлиненного шагов. При этом становится возможным избежать перекрещивания выводных концов с перемычками в фазах, что упрощает конструктивное выполнение выводов обмотки.

Для составления схемы роторной волновой обмотки с укороченными переходами при разном числе полюсов и пазов следует пользоваться таблицей 3.

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ СТАТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Как указывалось, поверочный расчет проводится для случая, когда электродвигатель, поступивший в ремонт, не включен в альбом обмоточных данных, но имеет заводской паспортный щиток и обмотку, сохранившуюся в такой степени, что представляется возможным безошибочно определить обмоточные данные электродвигателя — тип и схему обмотки, число эффективных проводов в пазу, число элементарных проводников в эффективном проводе, диаметр и марку провода и др.

Задача расчета заключается в вычислении электромагнитных нагрузок, степени (коэффициента) заполнения паза медью и сравнении вычисленных данных с допустимыми значениями, установленными длительным опытом проектирования и изготовления асинхронных электродвигателей.

Если выяснено, что электромагнитные нагрузки и коэффициент заполнения паза находятся в допустимых пределах, то есть все основания считать, что обмоточные данные электродвигателя соответствуют его паспортному щитку, и если при ремонте требуется сохранить его основные параметры — мощность, номинальное напряжение и частоту вращения, то можно полностью повторять существующие обмоточные данные, полностью копировать существующую обмотку.

Большое отличие вычисленных значений электромагнитных нагрузок и коэффициента заполнения паза от допустимых может быть в результате ошибок, допущенных во время предыдущих ремонтов. Не исключено, что паспорт и обмоточные данные не соответствуют друг другу из-за того, что предыдущий ремонт электродвигателя проводился с изменением номинальных параметров, но это не было отражено на заводском щитке. Также возможно, что завод-изготовитель по какой-либо производственной причине намеренно отошел от опти-

мального технического решения. Одной из таких причин может быть желание использовать существующие вырубные штампы от какой-нибудь определенной машины для штамповки листов стали к другой электрической машине с близкими, но не полностью совпадающими параметрами.

Исходные данные

На основании паспортных и обмоточных данных, а также снятых с натуры размеров электродвигателя определяют необходимые для расчета величины.

Число полюсов электродвигателя

$$2p = 120f/n_c, \quad (1)$$

где f - частота тока в питающей сети, Гц;
n_c — синхронная частота вращения электродвигателя (частота вращения магнитного поля статора)

Для частоты 50 Гц

$$2p = 6000/n_c \quad (2)$$

На паспортном щитке электродвигателя указывается не синхронная частота вращения, а действительная n, отличающаяся от синхронной на величину скольжения.

Скольжение при номинальной мощности электродвигателя выражается в процентах по отношению к синхронной частоте вращения

$$s = 100(n_c - n)/n_c \ \% \quad (3)$$

и составляет в зависимости от мощности электродвигателя 1,5—5%.

Таким образом, для определения числа полюсов следует частное от деления 6000 на число, указывающее действительную скорость вращения уменьшить на 1,5—5% — до ближайшего целого, четного числа.

Полюсное деление, см

$$\tau_1 = \pi D_1/(2p), \quad (4)$$

где D_1 — внутренний диаметр статора (диаметр расточки), см.

Зубцовый шаг, см

$$t_{з1} = \pi D_1/Z_1, \quad (5)$$

где Z_1 — число пазов статора.

Активная длина сердечника статора, см:

$$l_{a1}=k(l_1-n_{к1}b_{к1}),\qquad(6)$$

где l_1 — полная длина сердечника (включая радиальные вентиляционные каналы), см;
$n_{к1}$ — число вентиляционных каналов,
$b_{к1}$ — ширина вентиляционного канала, см;
k — коэффициент заполнения сердечника стали, зависящий от толщины листов, вида межлистовой изоляции, а также учитывающий не плотное прилегание листов друг к другу (значение коэффициента k приведено в таблице 4)

Таблица 4

Толщина листов статора	Значения k		
	бумага	лак	без изоляции или с оксидной изоляцией
0,5	0,9	0,93	0,95
0,35	0,87	0,91	0,93

Площадь паза $Q_{п1}$, см^2.

Наиболее распространенные формы пазов и формулы для определения их площадей приведены на рисунке 1.

Расчетная ширина зубца, см

$$b_{з1}-(2b'_{з1}/3)+(b''_{з1}/3),\qquad(7)$$

где $b'_{з1}$ ширина зубца в его самом узком месте, см;
$b''_{з1}$ — ширина зубца в его самом широком месте, см.

Как указывалось, задачей поверочного расчета является определение электромагнитных нагрузок коэффициента заполнения паза и сравнение их с допустимыми величинами.

Для статора характерными величинами являются.

B_δ — индукция в воздушном зазоре, Т;
B_{c1} индукция в спинке, Т;
$B_{з1}$ индукция в зубцах, Т;
j_1 — плотность тока, А/мм^2;
A_1 линейная нагрузка, А/см;
K_1 коэффициент заполнения паза.

Значения электромагнитных нагрузок асинхронных электродвигателей с обмоткой из медного провода в зависимости от их мощности указаны в таблице 5.

Таблица 5

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение нагрузок при мощности, кВт			
			свыше 100	10 100	1—10	до 1
Индукция в воздушном зазоре	B_δ	Т	1,0—0,9	0,9 0,7	0,7 0,6	0,6 0,3
Индукция в спинке статора	B_{c1}	Т	1,7 1,4	1,6 1,3	1,6—1,2	1,5–1,1
Индукция в спинке ротора	B_{c2}	Т	1,4—1,2	1,3 1,2	1,2 1,0	1,1—0,9
Индукция в зубцах статора	B_{z1}	Т	2,0 1,8	1,8 1,4	1,6–1,4	1,5–1,3
Индукция в зубцах ротора	B_{z2}	Т	1,8–1,6	1,6–1,4	1,4 1,3	1,3 1,1
Плотность тока в обмотке статора	j_1	А/мм²	5–3	5,5–4	6—5	8—6
Плотность тока в фазовой обмотке ротора	j_2	А/мм²	5,5—5	6—5,5	—	
Плотность тока в стержнях короткозамкнутого ротора	j_c	А/мм²	7,0—5,5	8,0—7,0	8,5—8,0	9,0—8,5
Плотность тока в замыкающем кольце короткозамкнутого ротора	$j_к$	А/мм²	5,0 4,0	5,5 5,0	6,0–5,5	7,0—6,5
Линейная нагрузка обмотки статора	A_1	А/см	350—600	250—400	200—300	100—200
Коэффициент заполнения паза статора:	K_1					
для трапециевидных пазов при однослойной обмотке;		—	0,45	0,43	0,40	0,37
то же при двухслойной обмотке;		—	0,42	0,40	0,37	0,36
для овальных пазов при однослойной обмотке;		—	0,55	0,50	0,46	0,42
то же, при двухслойной обмотке		—	0,45	0,43	0,40	0,37

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение нагрузок при мощности кВт			
			свыше 100	10—100	1—10	до 1
Произведение плотности тока на линейную нагрузку обмотки статора	j_1A_1	$A^2/(мм^2\ см)$	2000		1700	

Примечание. В электродвигателях с алюминиевой обмоткой электромагнитные нагрузки на 10—20% меньше, а коэффициент заполнения паза на 8—10% больше, чем в электродвигателях с медной обмоткой.

Расчетные формулы

Индукция в воздушном зазоре, Т

$$B_\delta = 2{,}5pU_{ф1}a_1 10^2/(l_1 Z_1 D_1 w_{эп1} k_{o1}), \tag{8}$$

где $U_{ф1}$ — фазовое напряжение, В;

$U_{ф1} = U_л$ — при соединении фаз в треугольник, В, (9)

$U_{ф1} = U_л/\sqrt{3}$ — при соединении фаз в звезду, В; (10)

$U_л$ — линейное напряжение, подводимое для питания электродвигателя, В;

$w_{эп1}$ — число эффективных проводов в пазу

$$w_{эп1} = 6w_{эф1}a_1/Z_1, \tag{11}$$

где a_1 число параллельных ветвей в фазе,

$w_{эф1}$ число эффективных (последовательно соединенных) витков в фазе,

k_{o1} — обмоточный коэффициент

Величина обмоточного коэффициента зависит от числа пазов, приходящихся на полюс и фазу q_1, и от укорочения шага обмотки β_1 (табл. 6).

Индукция в зубцах, Т

$$B_{з1} = B_\delta t_{з1} l_1/(b_{з1} l_{a1}). \tag{12}$$

Таблица 6

Число пазов на полюс и фазу, q_1	Значение обмоточного коэффициента $k_о$					
	1,0	0 95	0,90	0,85	0,80	0,75
1	1,000	0 997	0,988	0,972	0,951	0,924
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0 893
3	0,960	0,957	0 948	0,933	0,913	0,887
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885
5 -7	0,957	0,954	0 946	0,930	0,910	0,884
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883
9 и более	0,955	0,952	0,944	0,928	0,908	0 882

Продолжение

Число пазов на полюс и фазу, q_1	при укорочении шага обмотки в долях единицы, β,				
	0.70	0,65	0,60	0,55	0,50
1	0,891	0,853	0,809	0,760	0,700
2	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	0,855	0 819	0 779	0,730	0,672
4	0,854	0,817	0,777	0,728	0,67.
5—7	0,853	0 816	0,774	0,727	0,670
8	0,852	0,815	0,773	0 727	0,669
9 и более	0,851	0,815	0,773	0,726	0,668

Индукция в спинке, Т.

$$B_{c1}=0{,}55B_\delta D_1 l_1/(h_{c1} l_{a1} p), \qquad (13)$$

где высота спинки сердечника статора, см

$$h_{c1}=[(D_{н1} \quad D_1)/2]-h_{з1}$$

(здесь $h_{з1}$ - высота зубца статора, см).

Плотность тока, А/мм²:

$$j_1=I_{ф1}/(Q_{эп1}a_1)=I_{ф1}(q_1 m_1 a_1), \qquad (14)$$

где $Q_{эп1}$ — площадь сечения эффективного провода в пазу, мм²;

$_1$ — площадь сечения элементарного проводника, мм²;

m_1 — число элементарных проводников в эффективном проводе паза;

$I_{ф1}$ - номинальный ток в фазе, А;

при соединении фаз в звезду

$$I_{ф1}-1000\,P/(\sqrt{3}U\eta\cos\varphi); \qquad (15)$$

при соединении фаз в треугольник

$$I_{ф1} = 1000\,P/(3U\eta\cos\varphi), \qquad (16)$$

где P номинальная мощность электродвигателя (мощность на валу), кВт;

η — коэффициент полезного действия;

$\cos\varphi$ — коэффициент мощности.

Для приближенного определения значений η и $\cos\varphi$, если они не указаны на заводском паспортном щитке, можно пользоваться следующими данными: для электродвигателей защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором — таблица 7, для обдуваемых электродвигателей с короткозамкнутым ротором — таблица 8, для электродвигателей защищенного исполнения с фазовым ротором — таблица 9; для взрывозащищенных электродвигателей – таблица 10.

Таблица 7

Мощность, кВт	Частота вращения (синхронная), об/мин							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	η, %				$\cos\varphi$			
0,6	—	74,0	—	—	—	0,76	—	—
1,0	79,0	78,5	77,0		0,86	0,79	0,72	-
1,7	81,5	81,5	79,5	—	0,87	0,82	0,75	–
2,8	84,0	83,5	82,5	—	0,88	0,84	0,78	—
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,85	0,80
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90 0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84
75	91,0	91,5	92,0	—	0,91	0,89	0,88	-
100	91,5	92,0	—	—	0,92	0,89	—	—

Линейная нагрузка, А/см·

$$A_1 - I_{ф1} Z_1 w_{эп1}/(\pi D_1 a_1). \qquad (17)$$

Произведение $j \cdot A_1$ — один из факторов, определяющих нагрев электродвигателя. Его допустимое значение приведено в таблице 5.

Коэффициент заполнения паза. Некоторые авторы определяют коэффициент заполнения паза как отношение площади сечения всех неизолированных проводов,

Таблица 8

Мощность, кВт	Частота вращения (синхронная), об/мин							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	η, %				cos φ			
0,6	76,0	74,0	—	—	0,85	0,76	—	—
1,0	79,0	78,5	77,0	—	0,86	0,79	0,72	—
1,7	81,5	81,5	79,5	—	0,87	0,82	0,7	—
2,8	84,0	83,5	82,5	—	0,88	0,84	0 78	—
4,5	85,5	85,5	84,5	84,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,5	87,0	86,0	86,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	88,0	88,5	88,0	87,5	0,90	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,5	88,0	0,90	0,88	0,84	0 82
28	89,5	90,0	89,0	89,0	0,91	0,88	0,86	0,83
40	89,5	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,87	0,84
55	90,0	91,0	91,0	91,0	0,92	0,89	0 88	0,84
75	90,5	91,5	92,0	—	0,92	0,90	0,89	—
100	91,0	92,0	—	—	0,92	0,90	—	—

Таблица 9

Мощность, кВт	Частота вращения (синхронная), об/мин					
	1500	1000	750	1500	1000	750
	η, %			cos φ		
1,7	—	72,5	—	—	0,72	—
2,8	78,0	75,5	—	0,82	0,74	—
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84 0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,80	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	—	0,88	0,84	—
100	90,5	—	—	0,88	—	—

заложенных в паз, ко всей площади паза. Другие авторы рассчитывают его как отношение площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, к свободному сечению паза (т. е. к площади паза, за вычетом площадей, занимаемых клином, межслоевой проклад кой и пазовой изоляцией).

Коэффициент заполнения паза определяется так же, как отношение площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, к площади паза. Послед-

Мощность, кВт	Частота вращения (синхронная), об/мин					
	1500	1000	750	1500	1000	750
	η, %			cos φ		
1,7	—	72,5	—	—	0,72	—
2,8	78,0	75,5	—	0,82	0,74	-
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7,0	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	—	0,88	0,84	—
100	90,5	—	—	0,88	—	—

ний метод менее точен, чем два других, но более прост и практичен. Нами принят последний метод, при котором

$$K_1 = n_1 q_{эл}/Q_{п1} = w_{эп1} m_1 q_{эп1}/Q_{п1}, \quad (18)$$

где n_1 - общее число проводников, заложенных в паз;

$q_{эп1}$ — сечение изолированного элементарного проводника, мм^2.

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором из-за неправильного соотношения числа пазов статора, ротора и полюсов могут не запускаться при подключении к сети, или, начав вращаться, застревать на некоторой скорости, обычно составляющей $1/2$ от номинальной, или при вращении издавать характерный гул. Чтобы всего этого не произошло, надо выдерживать следующие соотношения между числами пазов статора, ротора и полюсов.

$$\begin{array}{ll} Z_2 \neq Z_1; & Z_2 \neq Z_1 + 2p; \\ Z_2 \neq 0{,}5Z_1; & Z_2 \neq 0{,}5Z_1 \pm p; \\ Z_2 \neq 2Z_1; & Z_2 \neq 2Z_1 \pm 2p; \\ Z_2 \neq 6pk; & Z_2 \neq 6pk \pm 1; \\ Z_2 \neq Z_1 \pm p; & Z_2 \neq 6pk \pm (2p+1), \end{array} \quad (19)$$

где k — любое целое число от 1 до 4.

Пример расчета

Требуется произвести поверочный расчет электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Паспортные данные электродвигателя, данные измерений и обмоточные данные

Мощность, кВт	$P = 4{,}5$
Напряжение, В	$U = 220/380$
Ток, А	$I = 16{,}3/9{,}4$
Коэффициент полезного действия, %	$\eta = 85{,}5$
Коэффициент мощности	$\cos\varphi = 0{,}85$
Частота вращения (синхронная), об/мин	$n_c = 1500$
Наружный диаметр сердечника статора, см	$D_{н1} = 24{,}5$
Внутренний диаметр сердечника статора, см	$D_1 = 15{,}2$
Полная длина сердечника статора, см	$l_1 = 9{,}0$
Высота спинки сердечника статора, см	$h_{c1} = 2{,}45$
Число радиальных вентиляционных каналов сердечника статора	$n_{к1} = 1$
Ширина радиального канала сердечника статора, см	$b_{к1} = 1{,}0$
Ширина зубца статора в самом узком месте, см	$b'_{з1} = 0{,}6$
Ширина зубца статора в самом широком месте, см	$b''_{з1} = 0{,}9$
Толщина листов стали сердечника статора 0,5 мм, межлистовая изоляция — лак	$k = 0{,}93$
Число пазов статора	$Z_1 = 36$
Площадь паза статора, мм²	$Q_{п1} = 206{,}5$
Число пазов ротора	$Z_2 = 26$
Тип обмотки статора	Однослойная с концентрическими катушками
Число эффективных проводов в пазу статора	$w_{эп1} = 32$
Число элементарных проводников в эффективном проводе обмотки статора	$m_1 = 1$
Число параллельных ветвей в фазе обмотки статора	$a_1 = 1$
Марка провода обмотки статора	ПЭЛБО
Диаметр неизолированного элементарного проводника, мм	$d_1 = 1{,}62$
Диаметр изолированного проводника, мм	$d_{и1} = 1{,}83$

Сечение неизолированного элементарного проводника, мм²	$q_1 = 2{,}06$
Сечение изолированного элементарного проводника, мм²	$q_{и1} = 2{,}62$
Исполнение электродвигателя	Защищенное

Расчет

Число полюсов электродвигателя (по формуле 1).

$$2p = 6000/1500 = 4.$$

Полюсное деление статора (по формуле 4):

$$\tau_1 = 3{,}14 \cdot 15{,}2/4 = 11{,}95 \text{ см}$$

Зубцовый шаг статора (по формуле 5):

$$t_{з1} = 3{,}14 \cdot 15{,}2/36 = 1{,}32 \text{ см}$$

Активная длина сердечника статора (по формуле 6):

$$l_{01} = 0{,}93(9{,}0 - 1 \cdot 1{,}0) = 7{,}44 \text{ см}$$

Расчетная ширина зубца статора (по формуле 7):

$$b_{з1} = (2\ 0{,}6/3) + (0{,}9/3) = 0{,}7 \text{ см}$$

Число пазов на полюс и фазу обмотки статора

$$q_1 = 36/(6 \cdot 2) = 3$$

Обмоточный коэффициент (согласно табл 6) $k_{o1} = 0{,}96$
Индукция в воздушном зазоре (по формуле 8)

$$B_\delta = 2{,}5\ 2\ 220 \cdot 1\ 10^2/(9{,}0 \cdot 36\ 15{,}2 \cdot 32 \cdot 0{,}96) = 0{,}73 \text{ Т}.$$

Индукция в зубцах статора (по формуле 12)

$$B_{з1} = 0{,}73 \cdot 1{,}32 \cdot 9{,}0/(0{,}7 \cdot 7{,}44) = 1{,}66 \text{ Т}$$

Индукция в спинке статора (по формуле 13)

$$B_{c1} = 0{,}55 \cdot 0{,}73\ 15{,}2 \cdot 9{,}0/(2\ 45\ 7{,}44 \cdot 2) = 1{,}51 \text{ Т}.$$

Плотность тока (по формуле 14):

$$j_1 = 9\ 4/(2{,}06\ 1 \cdot 1) = 4{,}56 \text{ А/мм}^2.$$

Линейная нагрузка (по формуле 17):

$$A_1\ 9{,}4\ 36\ 32/(3{,}14 \cdot 15{,}2\ 1) = 227 \text{ А/см}$$

Произведение $j_1 A_1 = 4{,}56 \cdot 227 - 1040$ А²/(мм²·см).
Коэффициент заполнения паза статора (по формуле 18).

$$K_1 = 32 \cdot 2{,}62/206{,}5 = 0{,}405$$

Соотношение между числами пазов статора, ротора и полюсов (по формулам 19)

$Z_2 \neq Z_1$;	$26 \neq 36$;
$Z_2 \neq 0{,}5 Z_1$;	$26 \neq 18$,
$Z_2 \neq 2Z_1$;	$26 \neq 72$;
$Z_2 \neq 6pk$;	$26 \neq 12, 24, 36$ и 48,
$Z_2 \neq Z_1 \pm p$,	$26 \neq 34$ и 38;

$Z_2 \neq Z_1 + 2p$;	$26 \neq 40$;
$Z_2 \neq 0{,}5Z_1 \pm p$;	$26 \neq 16$ и 20;
$Z_2 \neq 2Z_1 + 2p$,	$26 \neq 76$;
$Z_2 \neq 6pk \pm 1$,	$26 \neq 11$, 13, 23, 25, 35, 37, 47 и 49,
$Z_2 \neq 6pk \pm (2p+1)$,	$26 \neq 7$, 9, 15, 17, 19, 21, 27, 29, 31, 33, 39, 41, 43, 45, 51 и 53

Мощность электродвигателя (из формулы 15)

$$P = \sqrt{3} I_{\phi 1} U_{\phi 1} \eta \cos \varphi = \sqrt{3}\, 9{,}4 \cdot 380 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}855/1000 = 4{,}5 \text{ кВт}$$

Значения η и $\cos\varphi$, указанные в паспортных данных, совпадают с соответствующими значениями таблицы 7

Результаты расчета указывают, что электромагнитные нагрузки электродвигателя и коэффициент заполнения паза статора находятся в допустимых пределах, указанных в таблице 5. Также соблюдены требуемые соотношения между числами пазов и полюсов

Таким образом, подтверждаются данные электродвигателя, указанные на его паспортном щитке

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ РОТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ФАЗОВОЙ ОБМОТКОЙ

Исходные данные

Для ротора, как и для статора, на основании обмоточных данных и снятых с натуры размеров определяют необходимые для расчета величины.

Зубовый шаг

$$t_{з2} = \pi D_{н2}/Z_2, \qquad (20)$$

где $D_{н2}$ — наружный диаметр ротора, см,
Z_2 — число пазов ротора.

Активная длина сердечника стали ротора

$$l_{a2} = k(l_2 - n_{к2} b_{к2}), \qquad (21)$$

где l_2 — полная длина сердечника стали (включая радиальные вентиляционные каналы), см;
$n_{к2}$ — число вентиляционных каналов;
$b_{к2}$ — ширина вентиляционного канала, см;
k — коэффициент заполнения пакета стали (табл. 4).

Площадь паза

$$Q_{п2}, \text{ см}^2.$$

Наиболее распространенными являются пазы с параллельными боковыми стенками. Определение их площади не представляет труда

Расчетная ширина зубца

$$b_{з2} = (2b'_{з2}/3) + (b''_{з2}/3), \quad (22)$$

где $b'_{з2}$ - ширина зубца в его самом широком месте, см;

$b''_{з2}$ — ширина зубца в его самом узком месте, см

Расчетные формулы

Индукция в зубцах, Т:

$$B_{з2} = B_\delta t_{з2} l_{з2} / (b_{з2} l_{а2}) \quad (23)$$

Индукция в спинке, Т:

$$B_{с2} = 0{,}55 B_\delta D_{н2} / (h_{с2} p), \quad (24)$$

где высота спинки сердечника ротора

$$h_{с2} = [(D_{н2} - D_2)/2] - h_{з2}, \text{ см};$$

$h_{з2}$ — высота зубца ротора, см;
$D_{н2}$ — наружный диаметр ротора, см,
D_2 — внутренний диаметр ротора, см.

У электродвигателей малой мощности сердечник стали ротора насажен непосредственно на вал, т е внутренний диаметр ротора равен диаметру вала. Если у ротора в месте посадки на вал сделаны вентиляционные каналы (рис. 20), то при расчетах за внутренний диаметр ротора принимают диаметр окружности, описанный вокруг этих каналов

Фазовое напряжение, В·

$$U_{ф2} = U_{ф1} w_{эп2} Z_2 k_{о2} a_1 / (w_{эп1} Z_1 k_{о1} a_2), \quad (25)$$

где $w_{эп2}$ — число эффективных проводов в пазу ротора:

$$w_{эп2} = 6 w_{эф2} a_2 / Z_2, \quad (26)$$

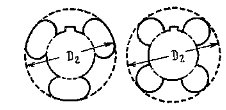


Рис. 20 Фигурные вентиляционные каналы в сердечнике ротора.

здесь $w_{эф2}$ — общее число витков в фазе обмотки ротора;

a_2 — число параллельных ветвей в фазе;

k_{o2} — обмоточный коэффициент (табл 6)

Фазовые роторы современных электродвигателей выполняют с волновой обмоткой, с двумя эффективными проводами в пазу стержнями прямоугольного сечения, т. е. $w_{эп2}=2$.

Петлевые обмотки роторов, состоящие из концентрических или цепных многовитковых катушек круглого провода, применялись в электродвигателях старых выпусков; роторы с такой обмоткой практически в ремонт теперь не поступают.

Напряжение между кольцами, В,

при соединении фаз в треугольник

$$U_2=U_{ф2}; \qquad (27)$$

при соединении фаз в звезду

$$U_2=\sqrt{3}\,U_{ф2} \qquad (28)$$

Напряжение между кольцами ротора не нормируется, но величина напряжения определяет уровень изоляции узла контактных колец. В электродвигателях мощностью до 15 кВт напряжение между кольцами находится в пределах 200 250 В, в электродвигателях до 50 кВт в пределах 350 В, в крупных электродвигателях оно достигает 1000 В и более.

Для снижения напряжения между кольцами фазы обмотки соединяются в треугольник или обмотку выполняют двумя параллельными ветвями. Величина тока, снимаемого с контактных колец, при этом увеличивается, поэтому, если напряжение между кольцами не превышает указанных величин, предпочтительно соединить фазы в звезду.

Ток ротора (фазовый), А:

$$I_{ф2}=0{,}9I_{ф1}Z_1\omega_{эп.}k_{o1}a_2/(Z_2\omega_{эп2}k_{o2}a_1), \qquad (29)$$

где $I_{ф1}$ — фазовый ток статора, А.

Плотность тока, А/мм²:

$$j_2=I_{ф2}/(Q_{эп2}a)=I_{ф2}/(q_2m_2a_2), \qquad (30)$$

где $Q_{эп2}$ — площадь сечения эффективного провода в пазу, мм²;

q_2 — площадь сечения элементарного проводника, мм^2,

m_2 число элементарных проводников в эффективном проводе паза

Линейная нагрузка, А/см.

$$A_2 - I_{ф2}Z_2w_{эп2}/(\pi D_{п2}a_2). \qquad (31)$$

Коэффициент заполнения паза ротора, как и для статора, определяется отношением площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, к площади паза. Если у волновой обмотки в пазу два стержня, этот коэффициент не нормируется; его определяют в каждом отдельном случае, исходя из конкретных размеров паза, стержня и изоляции

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В электродвигателях с короткозамкнутым ротором обмотку последнего, так называемую беличью клетку, получают путем заливки пазов алюминиевым сплавом (в основном алюминиево-марганцовистый) с повышенным удельным сопротивлением. Как одно целое отливаются стержни, короткозамыкающие кольца и, если это предусмотрено конструкцией электродвигателя, вентиляционные лопатки При ремонте такую обмотку частично или полностью восстанавливают по заводскому исполнению и нет надобности в ее электрическом или механическом расчете. Следует только сохранить химический состав сплава, чтобы сохранить активное сопротивление обмотки, пусковой момент электродвигателя и величину скольжения при номинальной нагрузке.

У электродвигателей средней и высокой мощности беличьи клетки могут быть не литые алюминиевые, а сварные из меди или латуни (в этой конструкции стержни, заложенные в пазы, приварены к короткозамыкающим кольцам, расположенным по торцам ротора).

При поверочном расчете короткозамкнутого ротора с любой клеткой следует по формулам (23) и (24) определить индукцию в зубцах и спинке ротора и сравнить их с допустимыми, указанными в таблице 5

Для сварных клеток также определяют следующие параметры.

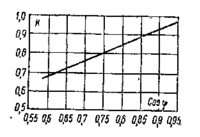


Рис 21. Зависимость коэффициента K от $\cos\varphi$.

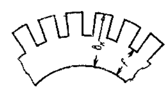


Рис. 22. Короткозамыкающее кольцо с пазами для стержней.

Ток в стержне обмотки (беличьей клетке), А:

$$I_c = KI_{\text{ф}1}6\omega_{\text{эп}1}k_{o1}/Z_2, \quad (32)$$

где K — коэффициент, зависящий от $\cos\varphi$ электродвигателя (определяется по кривой, рис. 21).

Ток в короткозамыкающем торцевом кольце, А:

$$I_к = I_c/(2\sin\frac{\beta}{2}), \quad (33)$$

где β - угол сдвига токов в соседних стержнях, рад:

$$\beta - 2\pi p/Z_2. \quad (34)$$

Плотность тока в стержнях и замыкающем кольце также сравнивают с допустимыми по таблице 5 величинами.

Кроме того, нужно проверить величину механического напряжения от растяжения, возникающего при вращении ротора в короткозамыкающем кольце под действием центробежных сил и веса кольца.

Для массивных колец, не ослабленных пазами под стержни, кгс/см²:

$$\sigma = 2{,}8D_к n_c \varphi 10^{-8}, \quad (35)$$

где $D_к$ — средний диаметр кольца, см;
φ — удельный вес материала кольца, г/см³.

Для колец с пазами под стержни (рис. 22), кгс/см².

$$\sigma_1 = \sigma b_к/f, \quad (36)$$

где $b_к$ — радиальная толщина кольца, см,
f — высота мостика, см.

РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Исходные данные

Переводя электродвигатель на новое напряжение при той же частоте вращения, надо сохранить его мощность, а для этого следует оставить неизменными индукцию на всех участках магнитной цепи и объем тока в пазу.

Из формулы (8) * при неизменной индукции в зазоре следует

$$U_{ф1с}a_{с}/(w_{эп1с}k_{о1с}) = U_{ф1н}a_{н}/(w_{эп1н}k_{о1н}) \qquad (37)$$

При сохранности типа и шага обмотки

$$w_{эп1н} = w_{эп1с}U_{ф1н}/U_{ф1с}. \qquad (38)$$

Из формул (15) и (16) получим, при сохранении плотности тока:

$$I_{ф1н}/I_{ф1с} = U_{ф1с}/U_{ф1н} = Q_{эп1н}/Q_{эп1с}, \qquad (39)$$

или

$$Q_{эп1н} = Q_{эп1с}U_{ф1с}/U_{ф1н}. \qquad (40)$$

Таким образом, при сохранении скорости вращения, плотности тока и мощности число эффективных проводов в пазу изменяется прямо пропорционально, а их сечение — обратно пропорционально новому и старому напряжению.

Если число проводов в пазу увеличивается, увеличится и объем, занимаемый изоляцией проводов, поэтому рекомендуется применять элементарные проводники большего диаметра, входящие в эффективный провод, или обмоточные провода с более тонкой изоляцией. Иногда приходится прибегать к уменьшению числа параллельных ветвей в фазе и тем самым увеличивать сечение провода в каждой из параллельных ветвей.

Однако упомянутые мероприятия по увеличению коэффициента заполнения паза не всегда можно осуществить, или эффект их может оказаться недостаточным. Кроме того, переход на более высокое напряжение может быть связан с утолщением пазовой изоляции, поэтому не всегда удается сохранить общее сечение меди

* Здесь к обозначениям, относящимся к старому исполнению, добавляется индекс «с» и к новому исполнению — индекс «н». Эти индексы следует добавлять при последующих расчетах.

в пазу, что вынуждает снизить мощность электродвигателя.

При переводе крупных электродвигателей с номинального напряжения 3 кВ на 6 кВ практически потери мощности достигает 15—20%.

Перевод электродвигателей на пониженное напряжение во многих случаях позволяет увеличить их мощность благодаря облегчению пазовой изоляции и уменьшению числа эффективных проводов в пазу.

При переводе электродвигателя на новое напряжение обмотка ротора не нуждается в изменении; как следует из формул (25) и (29), напряжение на кольцах ротора и фазовый ток при этом остаются прежними

Пример расчета

Требуется рассчитать обмотки электродвигателя напряжением 127/220 В при изменении напряжения на 220/380 В

Обмоточные данные электродвигателя (127/220 В)

Мощность, кВт	P_c 8,0
Напряжение, В	$U_c = 127/220$
Число эффективных проводов в пазу обмотки статора	$w_{эп1с} = 20$
Число элементарных проводников в эффективном проводе	$m_{1с} = 2$
Число параллельных ветвей в фазе обмотки	$a_{1с}$ 1
Марка провода	ПЭЛБО
Диаметр неизолированного элементарного проводника, мм	$d_{1с} = 1,3$
Диаметр изолированного элементарного проводника, мм	$d_{и1с} = 1,51$
Сечение неизолированного элементарного проводника, мм²	$q_{1с} = 1,327$
Сечение изолированного элементарного проводника, мм	$q_{и1с}$ 1,791
Тип обмотки	Однослойная
Площадь паза, мм²	$Q_{п1}$ 160
Форма паза	Овальная

Расчет

Число эффективных проводов в пазу при изменении напряжения на 220/380 В (с условием сохранения схемы обмотки и числа элементарных проводников в эффективном проводе,— по формуле 38)

$$w_{эп1н} = w_{эп1с} U_{1н} / U_{1с} = 20 \quad 220/127 = 34,6 —$$

округляется до ближайшего целого числа 35

Сечение неизолированного элементарного проводника (по формуле 40)

$$q_{1н}=q_{1с}U_{1с}/U_{1н}=1{,}327\cdot 127/220=0{,}77 \text{ мм}^2$$

Диаметр неизолированного элементарного проводника

$$d_{1н}=1{,}13\sqrt{0{,}77}=0{,}99 \text{ мм}—$$

округляется до ближайшего стандартного размера 1 мм

Диаметр изолированного элементарного проводника при сохранении марки провода ПЭЛБО и двухсторонней толщине изоляции 0,21 мм $d_{и1н}=1{,}0+0{,}21=1{,}21$ мм

Сечение изолированного элементарного проводника

$$q_{н1н}=\pi d^2_{н1н}/4=3{,}14\cdot 1{,}21^2/4=1{,}15 \text{ мм}^2$$

Указанное уменьшение диаметра провода при одновременном увеличении числа проводов, укладываемых в паз ухудшает коэффициент заполнения паза По формуле (18)

$$K_{1с}=w_{эп1с}m_{1с}q_{н1с}/Q_{п1}=20\cdot 2\cdot 1{,}791/160{,}0=0{,}45,$$

$$K_{1н}=35\cdot 2\cdot 1{,}15/160{,}0=0{,}50$$

Столь значительное повышение коэффициента заполнения паза недопустимо, так как может привести к повреждению изоляции при укладке обмотки, поэтому необходимо либо выбрать провод другой марки с более тонкой изоляцией, либо применить для изоляции паза более тонкие материалы с повышенной электрической прочностью.

Если это невозможно, рационально изменить обмоточные данные: выполнить обмотку с одной ветвью в фазе, вместо двух, без разбивки эффективного провода на элементарные проводники.

При этом перерасчете

сечение неизолированного элементарного проводника (который является также эффективным проводом) $q_{1н}=0{,}77\cdot 2=1{,}54$ мм²;

диаметр неизолированного элементарного проводника $d_{1н}=1{,}13\sqrt{1{,}54}=1{,}4$ мм,

диаметр изолированного элементарного проводника при марке провода ПЭЛБО с двухсторонней толщиной изоляции 0,21 мм $d_{н1н}=1{,}4+0{,}21=1{,}61$ мм,

сечение изолированного элементарного проводника $q_{н1н}=\pi d^2_{н1н}/4=3{,}14\cdot 1{,}61^2/4=2{,}036$ мм²,

коэффициент заполнения паза $K_{1н}=35\cdot 2{,}036/160{,}0=0{,}445$ — совпадает с его значением до перевода электродвигателя на напряжение 220/380 В

РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Общие сведения

Переводя на другую частоту вращения электродвигатель с короткозамкнутым ротором, следует сверить по формуле (19) возможность такого перевода с точки зрения допустимого соотношения нового, измененного числа полюсов и числа пазов статора и ротора.

При уменьшении числа полюсов и сохранении индукции в воздушном зазоре увеличивается индукция в спинках сердечников статора и ротора. При увеличении числа полюсов зависимость будет обратная. Индукции же в зубцах сердечников статора и ротора остаются неизменными.

Пересчет электродвигателя в связи с изменением числа полюсов следует начинать с определения индукции на всех участках магнитной цепи. В некоторых случаях может оказаться, что спинки сердечников статора и ротора недостаточно загружены магнитным потоком и индукция в них может быть повышена. Такая недогрузка бывает у электродвигателей старых выпусков — в них активные материалы не всегда были загружены полностью.

Когда при измененном числе полюсов индукция в зазоре и зубцах охраняется и когда возросшая индукция в спинке не окажется чрезмерной (превышение приведенных в таблице 5 значений не более чем на 10—15%), при пересчете руководствуются следующими рекомендациями.

При сохранении индукции в зазоре и номинального фазового напряжения (см. формулу 8),

$$p_{\text{с}} a_{1\text{с}} / (\omega_{\text{эп1с}} k_{\text{о1с}}) = p_{\text{н}} a_{1\text{н}} / (\omega_{\text{эп1н}} k_{\text{о1н}}),$$

т. е. новое число эффективных проводов в пазу

$$\omega_{\text{эп1н}} = \omega_{\text{эп1с}} k_{\text{о1с}} a_{1\text{н}} p_{\text{н}} / (k_{\text{о1н}} a_{1\text{с}} p_{\text{с}}) =$$
$$= w_{\text{эп1с}} k_{\text{о1с}} n_{\text{сс}} a_{1\text{н}} / (k_{\text{о1н}} n_{\text{сн}} a_{1\text{с}}).$$

Если сохраняются тип, шаг обмотки и объем тока в пазу, сечение эффективного провода и число проводов в пазу соответственно составят:

$$Q_{\text{эп1н}} = Q_{\text{эп1с}} p_{\text{с}} / p_{\text{н}} = Q_{\text{эп1с}} n_{\text{сн}} / n_{\text{сс}}, \quad (41)$$

$$w_{\text{эп1н}} = w_{\text{эп1с}} p_{\text{н}} / p_{\text{с}} = w_{\text{эп1с}} n_{\text{сс}} / n_{\text{сн}}. \quad (42)$$

Номинальная мощность электродвигателя

$$P_{\text{н}} = P_{\text{с}} p_{\text{с}} / p_{\text{н}} = P_{\text{с}} n_{\text{сн}} / n_{\text{сс}}. \quad (43)$$

Указанное в формуле (43) изменение мощности электродвигателя при изменении частоты вращения можно рассматривать как приближенное, так как при увеличении частоты вращения увеличиваются потери на трение, хотя и повышается производительность вентилятора.

Когда при увеличении частоты вращения приходится уменьшать индукцию в зазоре, чтобы ввести в норму индукции в спинках сердечников статора и ротора, пропорционально увеличивается число эффективных проводов в пазу и уменьшается сечение эффективного провода и номинальная мощность электродвигателя.

Если число эффективных проводов в пазу увеличить, ухудшится коэффициент заполнения паза. Поэтому при перемотке электродвигателя следует применять провода с более тонкой изоляцией и максимально допустимого диаметра (из условия возможности укладки провода через шлиц паза).

Для увеличения диаметра провода следует пересмотреть и по возможности уменьшить число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе.

Увеличение мощности электродвигателя при повышении частоты вращения может ограничиваться механической прочностью его частей и их нагревом.

Окружная скорость ротора

$$v_p = \pi D_{н2} n / (60 \cdot 100). \qquad (44)$$

Она не должна превышать для фазового ротора 30—40 м/с, а для короткозамкнутого ротора — 40—60 м/с.

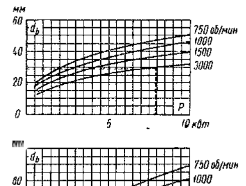
Бандаж фазового ротора при увеличении скорости вращения обычно усиливают. Требуемое число витков бандажа

$$w = 1{,}63 \cdot 10^{-6} Q D_c n^2 / [d (R_z - \sigma)], \qquad (45)$$

где Q — вес лобовой части обмотки с изоляцией, кг;
D_c — средний диаметр обмотки в лобовых частях, см;
n — номинальная частота вращения ротора, об/мин;
d — диаметр проволоки бандажа, находящийся в зависимости от диаметра ротора:

диаметр ротора, см	10,0	20,0	21,0—40,0	41,0—60,0	61,0—100,0	Свыше 100,0
диаметр проволоки, мм		0,8	1,0	1,2	1,5	2,0

R_z — допускаемое напряжение растяжения в бандаже, равное 3000—3500 кгс/см²,



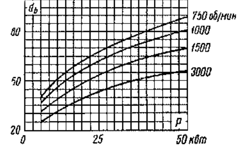


Рис 23. Минимально допустимый диаметр вала в зависимости от мощности электродвигателя.

σ — напряжение в бандаже, возникающее от его веса при вращении,

$$\sigma = 0{,}3 \cdot 10^{-6} D^2_б n^2 \text{ кгс/см}^2,$$

где $D_б$ — диаметр бандажа.

Если проволоки требуемого диаметра нет и ее заменяют проволокой другого диаметра, число витков в равнопрочном бандаже при этом

$$w = w_{тр} d^2_{тр} / d^2, \tag{46}$$

где $w_{тр}$ число витков бандажа, требуемое по расчету;
w — то же, при замене проволоки;
$d_{тр}$ — диаметр проволоки, требуемый по расчету, мм;
d — диаметр заменяющей бандажной проволоки, мм.

По схеме (рис 23) следует проверить прочность свободного конца вала (т. е. конца вала, служащего для насадки шкива, муфты или шестерни).

Нагрев подшипников также увеличивается при повышении скорости вращения и увеличении мощности электродвигателя, что отрицательно сказывается на общем коэффициенте полезного действия электродвигателя.

При перемотках, связанных с уменьшением числа полюсов, увеличивается шаг обмотки и вылет лобовых частей. Здесь следует проверить, допустимо ли это с точки зрения обеспечения требуемого изоляционного расстояния между торцевыми крышками и обмоткой.

Пример расчета

Требуется рассчитать обмотку электродвигателя при изменении частоты вращения с 1500 на 3000 об/мин

Паспортные и обмоточные данные электродвигателя (частота вращения 1500 об/мин)

Мощность, кВт	$P_c = 4{,}5$
Напряжение, В	$U = 220/380$
Ток, А	$I_c = 16{,}3/9{,}4$
Частота вращения, об/мин	$n_{cc} = 1500$
Внутренний диаметр сердечника статора, см	$D_1 = 15{,}20$
Наружный диаметр сердечника ротора, см	$D_{н2} = 15{,}12$
Полная длина сердечника статора, см	$l_1 = 12{,}0$
Полная длина сердечника ротора, см	$l_2 = 12{,}0$
Высота спинки статора, см	$h_{c1} = 2{,}5$
Высота спинки ротора, см	$h_{c2} = 3{,}0$
Число радиальных вентиляционных каналов статора	$n_{к1} = 2$
Ширина радиального канала статора, см	$b_{к1} = 1{,}0$
Ширина зубца статора (расчетная), см	$b_{з1} = 0{,}7$
Коэффициент заполнения сердечника из стали 0,5 мм, межлистовая изоляция — лак	$k = 0{,}93$
Число пазов статора	$Z_1 = 36$
Число пазов ротора	$Z_2 = 26$
Площадь паза статора, мм²	$Q_{п1} = 230$
Тип обмотки статора	Двухслойная
Марка провода обмотки статора	ПЭЛБО
Число эффективных проводов в пазу статора	$w_{эп1с} = 32$
Число элементарных проводников в эффективном проводе обмотки статора	$m_{1c} = 2$

Число параллельных ветвей в обмотке статора	$a_{1c}=1$
Диаметр неизолированного элементарного проводника обмотки статора, мм	$d_{1c}=1,16$
Диаметр изолированного элементарного проводника обмотки статора, мм	$d_{и1c}=1,37$
Сечение неизолированного элементарного проводника обмотки статора, мм^2	$q_{1c}=1,057$
Сечение изолированного элементарного проводника обмотки статора, мм^2	$q_{и1c}=1,474$
Ротор электродвигателя	Короткозамкнутый без вентиляционных каналов
Диаметр вала мм	$d_{в}=45$
Исполнение электродвигателя	Защищенное

Расчет

Число полюсов электродвигателя (по формуле 2)

$$2p_{н}=6000/3000=2$$

Полюсное деление статора (по формуле 4)

$$\tau_{1н}=3,14\cdot15,2/2=23,9 \text{ см}$$

Активная длина сердечника статора (по формуле 6)

$$l_{a1}=0,93(12,0-2\cdot1,0)=9,3 \text{ см}$$

Активная длина сердечника ротора (по формуле 21)

$$l_{a2}=0,93\cdot12,0=11,2 \text{ см}$$

Число пазов на полюс и фазу обмотки статора

$$q_{1н}=36/(6\cdot1)=6$$

Обмотка статора сохраняется двухслойной, укорочение шага принимается равным 0,7, шаг обмотки статора $y_{п1н}=0,7\cdot36/2=12,6$, округляется до ближайшего целого числа 13

Обмоточный коэффициент (по табл 6). $k_{о1н}=0,853$

Соотношение между числами пазов статора, ротора и полюсов (по формуле 19)

$Z_2 \neq Z_1$;	$26\neq36$,
$Z_2\neq0,5Z_1$;	$26\neq18$;
$Z_2 \neq 2Z_1$;	$26\neq72$;
$Z_2\neq6pk$;	$26\neq6$, 12, 18, 24;
$Z_2\neq Z_1\mp p$,	$26\neq35$, 37,
$Z_2 \neq Z_1\pm2p$;	$26\neq34$, 38;
$Z_2\neq0,5Z_1\pm p$;	$26\neq17$, 19;
$Z_2 \neq 2Z_1+2p$;	$26\neq74$,
$Z_2\neq6pk\pm1$,	$26\neq5$, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25;
$Z_2\neq6pk\pm(2p\pm1)$	$26\neq3$, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27.

Изменение числа полюсов не вызовет «прилипания» и «застревания» ротора, а также повышенного шума при работе электродвигателя.

Окружная скорость ротора (по формуле 44)

$$v_р=\pi D_{н2}n_н/(60\cdot 100) = 3{,}14\cdot 15{,}12\cdot 3000/(60\cdot 100) = 23{,}8 \text{ м/с},$$

т. е. значительно меньше предельной.

Прочность свободного конца вала диаметром 45 мм, согласно рисунку 23, удовлетворяет условию прочности.

Число эффективных проводов в пазу статора при сохранении типа обмотки (предварительно) — по формуле (42):

$$w_{эп1н}=32/2=16.$$

Индукция в воздушном зазоре (по формуле 8)

$$B_{\delta н}=2{,}5\cdot 1\cdot 220\cdot 1\cdot 10^7/(12{,}0\cdot 36\cdot 15{,}2\cdot 16\cdot 0{,}853)=0{,}61 \text{ Т}.$$

Индукция в спинке статора (по формуле 13)

$$B_{с1н}=0{,}55\cdot 0{,}61\cdot 15{,}2\cdot 12\cdot 1/(2{,}5\cdot 9{,}3\cdot 1)=2{,}6 \text{ Т}.$$

Индукция в спинке ротора (по формуле 24)

$$B_{с2н}=0{,}55\cdot 0{,}61\cdot 15{,}12\cdot 12\cdot 1/(3{,}0\cdot 11{,}2\cdot 1)=1{,}8 \text{ Т}.$$

Индукция в спинке статора превосходит максимально допустимую и должна быть снижена. Индукция в теле ротора находится в допустимых пределах. Индукции в зубцах статора и ротора не проверяются (изменение числа полюсов не влияет на их величину).

Индукцию в спинке статора принимаем равной 1,6 Тл. В соответствии с этим пересчитываем

$$w_{эп1н}=16\cdot 2{,}6/1{,}6=26.$$

Коэффициент заполнения паза статора в заводском электродвигателе при частоте вращения 1500 об/мин (по формуле 18)

$$K_{1с}=w_{эп1с}m_{1с}q_{н1с}/Q_{п1}=32\cdot 2\cdot 1{,}474/230=0{,}41.$$

Сечение и диаметр изолированного элементарного проводника обмотки статора при сохранении коэффициента заполнения паза и числа элементарных проводников в эффективном проводе в заводском исполнении

$$q_{н1н}=Q_{п1}K_{1с}/(w_{эп1н}m_{1с})=230\cdot 0{,}41/(26\cdot 2)=1{,}8 \text{ мм}^2,$$

$$d_{н1н}=1{,}13\sqrt{q_{н1н}}=1{,}13\sqrt{1{,}8}=1{,}51 \text{ мм}.$$

Диаметр неизолированного элементарного проводника обмотки статора при сохранении марки провода ПЭЛБО с двухсторонней толщиной изоляции 0,21 мм:

$$d_{1н}=1{,}51-0{,}21=1{,}3 \text{ мм}.$$

Сечение неизолированного элементарного проводника обмотки статора

$$q_{1н}=3{,}14\cdot 1{,}3^2/4=1{,}327 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в обмотке статора, в заводском исполнении (по формуле 14)

$$j_{1с}=I_{ф1с}/(q_{1с}m_{1с}a_{1с})=9{,}4/(1{,}057\cdot 2\cdot 1)=4{,}45 \text{ А/мм}^2$$

Фазовый ток при сохранении плотности тока в заводском исполнении

$$I_{ф1н}=4{,}45\cdot1{,}327\cdot2\cdot1=11{,}8\ А$$

Мощность электродвигателя (из формулы 15)

$$P_н=(\sqrt{3}\cdot11{,}8\cdot380\cdot0{,}87\cdot0{,}89)/1000=6{,}0\ кВт$$

Значения $\eta_н$ и $\cos\varphi_н$ приняты по таблице 7.

Таким образом, при изменении частоты вращения от 1500 до 3000 об/мин мощность электродвигателя увеличится в 6,0/4,5=1,33 раза

РАСЧЕТ ПРИ ЗАМЕНЕ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ АЛЮМИНИЕВЫМИ

Общие сведения

При ремонте обмоток, связанном с заменой медных проводов алюминиевыми, основным фактором, влияющим на ход расчета, является различие в удельном сопротивлении проводов, составляющем при 20° С:

для меди $\rho_м=0{,}017$ Ом·мм²/м;

для алюминия $\rho_а=0{,}028$ Ом·мм²/м.

Отношение удельных сопротивлений алюминия и меди

$$\rho_а/\rho_м=0{,}028/0{,}017=1{,}65.$$

Если вместо медной обмотки выполнить алюминиевую проводом того же размера, оставив без изменения индукцию в воздушном зазоре и число эффективных проводов в пазу, то при номинальном токе возрастут потери в обмотке. Потери в стали останутся без изменения. Чтобы сохранить потери в обмотке на прежнем уровне и тем самым сохранить суммарные потери электродвигателя, необходимо снизить фазовый ток. Это снижение определится следующим образом,

потери в фазе медной обмотки статора, Вт

$$\Delta P_м=I^2_{ф1м}\rho_м l/(Q_{эп1м}a_1), \qquad (47)$$

потери в фазе алюминиевой обмотки статора, Вт

$$\Delta P_а=I^2_{ф1а}\rho_а l/(Q_{эп1а}a_1),$$

где l — длина всех эффективных проводов в фазе.

Здесь и далее к обозначениям, относящимся к исполнению обмотки медным проводом, добавлен индекс «м», к исполнению алюминиевым «а».

Если

$$Q_{эп1а} = Q_{эп1м} \text{ и } \Delta P_м = \Delta P_а,$$

$$I_{ф1а} - I_{ф1м}/\sqrt{1,65} - 0,78 I_{ф1м}, \quad (49)$$

т. е. фазовый ток должен быть снижен на 22% Практически на столько же снижается и номинальная мощность электродвигателя.

Если же требуется сохранить номинальные ток и мощность электродвигателя, то для сохранения потерь в обмотке статора следует увеличить сечение эффективного проводника. Это увеличение определяется следующим образом.

Так как

$$I_{ф1}^2 \rho_м l / Q_{эп1м} - I_{ф2}^2 \rho_а l / Q_{эп1а},$$

то

$$\rho_м / Q_{эп1м} = \rho_а / Q_{эп1а} = 1,65 \rho_м / Q_{эп1а},$$

или

$$Q_{эф1а} = 1,65 Q_{эф1м} \quad (50)$$

При изготовлении обмотки из круглых проводов диаметр неизолированного алюминиевого провода должен быть больше диаметра медного·

$$d_а = \sqrt{1,65} d_м - 1,28 d_м, \text{ т. е. на } 28\%.$$

Совершенно ясно, что укладка проводов при таком увеличении диаметра невозможна. Тем не менее медная обмотка статора электродвигателей мощностью до 100 кВт единой серии А и АО и тем более электродвигателей старых типов и серий может быть заменена на алюминиевую без снижения мощности электродвигателя или с минимальным снижением. Это достигается следующими способами:

повышением класса нагревостойкости пазовой изоляции и изоляции обмоточных проводов * от класса А, применяемого для электродвигателей серии А и АО, до класса Е, что позволяет увеличить диаметр алюминиевой жилы по отношению к медной не на 28, а только на 11%;

---

* Применяются алюминиевые обмоточные провода ПЭВА 2 на поливинилацеталевом лаке или ПЭЛРА 2 на полиамиднорезольном лаке, относящиеся по нагревостойкости к классу Е

Таблица 11

ПЭЛБО			ПЭВА-2 (ПЭЛРА-2)					Допустимый ток* электродвигателя, %	
$d_м$, мм	$d_{нм}$, мм	$q_м$, мм²	$d_а$, мм	$d_{на}$, мм	$q_а$, мм²	$d_а/d_м$	$q_а/q_м$	в классе А	в классе Е
0,44	0,595	0,152	0,57	0,625	0,256	1,30	1,68	100	100
0,47	0,625	0,173	0,59	0,645	0,273	1,26	1,56	98,5	100
0,49	0,645	0,188	0,62	0,675	0,302	1,27	1,60	100,0	100
0,51	0,670	0,204	0,64	0,700	0,322	1,26	1,58	98,0	100
0,53	0,690	0,221	0,67	0,730	0,353	1,27	1,60	100,0	100
0,55	0,710	0,238	0,69	0,750	0,374	1,26	1,57	98,5	100
0,57	0,730	0,255	0,69	0,750	0,374	1,21	1,47	94,0	100
0,59	0,750	0,273	0,72	0,780	0,407	1,22	1,49	95,0	100
0,62	0,780	0,302	0,74	0,805	0,436	1,19	1,42	93,5	100
0,64	0,800	0,322	0,77	0,835	0,466	1,20	1,45	94,0	100
0,67	0,830	0,353	0,80	0,865	0,503	1,19	1,42	93,5	100
0,69	0,850	0,374	0,83	0,895	0,541	1,20	1,45	94,0	100
0,72	0,890	0,407	0,86	0,925	0,581	1,19	1,48	93,5	100
0,74	0,910	0,430	0,90	0,965	0,636	1,22	1,48	95,0	100
0,77	0,940	0,466	0,93	0,995	0,679	1,21	1,46	94,0	100
0,80	0,970	0,503	0,96	1,025	0,724	1,20	1,44	94,0	100
0,83	1,000	0,541	0,96	1,025	0,724	1,15	1,34	90,0	100
0,86	1,030	0,581	1,00	1,080	0,785	1,16	1,35	91,0	100
0,90	1,070	0,636	1,04	1,120	0,849	1,15	1,33	90,0	100
0,93	1,100	0,679	1,08	1,160	0,916	1,17	1,35	92,0	100
0,96	1,130	0,724	1,12	1,200	0,985	1,17	1,36	92,0	100
1,00	1,200	0,785	1,16	1,240	1,067	1,16	1,34	91,0	100
1,04	1,240	0,849	1,20	1,260	1,131	1,15	1,33	90,0	100
1,08	1,290	0,916	1,25	1,330	1,237	1,16	1,34	91,0	100
1,12	1,320	0,985	1,30	1,380	1,327	1,16	1,35	91,0	100
1,16	1,360	1,067	1,35	1,430	1,431	1,17	1,36	92,0	100
1,20	1,400	1,131	1,40	1,480	1,539	1,17	1,36	92,0	100
1,25	1,450	1,227	1,45	1,530	1,651	1,16	1,35	91,0	100
1,30	1,500	1,327	1,50	1,580	1,767	1,15	1,33	90,0	100
1,35	1,550	1,431	1,68	1,640	1,911	1,15	1,33	90,0	100
1,40	1,605	1,539	1,62	1,700	2,061	1,16	1,34	91,0	100
1,45	1,655	1,651	1,68	1,760	2,217	1,16	1,34	91,0	100
1,50	1,705	1,767	1,74	1,820	2,379	1,16	1,34	91,0	100
1,56	1,765	1,911	1,81	1,890	2,573	1,16	1,34	91,0	100
1,62	1,825	2,061	1,88	1,860	2,776	1,16	1,34	91,0	100
1,68	1,885	2,217	1,95	2,030	2,986	1,16	1,35	91,0	100
1,74	1,945	2,379	1,95	2,030	2,986	1,12	1,26	87,5	97,0
1,81	2,015	2,573	2,02	2,100	3,205	1,12	1,25	87,5	97,0
1,86	2,085	2,786	2,10	2,190	3,464	1,12	1,25	87,5	97,0
1,95	2,155	2,986	2,10	2,190	3,464	1,08	1,16	84,5	94,0
2,02	2,230	3,205	2,26	2,350	4,011	1,12	1,25	87,5	97,0
2,10	2,310	3,464	2,26	2,350	4,011	1,08	1,16	84,5	94,0

* Слева приведены величины допускаемого тока электродвигателя при сохранении изоляции класса нагреваемости А, а справа — для случая перехода на изоляцию класса нагреваемости Е (в % по отношению к номинальному току при медной обмотке).

Таблица 12

ПБД			ЛЭВА-2 (ПЭЛРА-2)			$d_{з}/d_{м}$	$q_{з}/q_{м}$	Допустимый ток* электродвигателя, %	
$d_{м}$, мм	$d_{им}$, мм	$q_{м}$, мм²	$d_{з}$, мм	$d_{из}$, мм	$q_{з}$, мм²			в классе А	в классе Е
0,38	0,00	0,113	0,57	0,625	0,255	1,50	2,26	100	100
0,41	0,63	0,132	0,59	0,645	0,273	1,44	2,07	100	100
0,44	0,66	0,152	0,64	0,700	0,322	1,45	2,12	100	100
0,47	0,69	0,173	0,67	0,730	0,353	1,43	2,06	100	100
0,49	0,71	0,189	0,69	0,750	0,374	1,41	1,98	100	100
0,51	0,73	0,204	0,69	0,750	0,374	1,35	1,83	100	100
0,53	0,75	0,221	0,72	0,780	0,407	1,36	1,84	100	100
0,55	0,77	0,232	0,74	0,805	0,430	1,35	1,81	100	100
0,57	0,79	0,255	0,77	0,835	0,468	1,35	1,83	100	100
0,59	0,81	0,273	0,77	0,835	0,466	1,31	1,71	100	100
0,62	0,84	0,302	0,80	0,865	0,503	1,29	1,66	100	100
0,64	0,86	0,322	0,83	0,895	0,541	1,30	1,68	100	100
0,67	0,89	0,353	0,86	0,925	0,581	1,28	1,65	100	100
0,69	0,91	0,374	0,90	0,965	0,636	1,30	1,70	100	100
0,72	0,94	0,407	0,93	0,995	0,679	1,29	1,67	100	100
0,74	0,90	0,430	0,93	0,995	0,679	1,26	1,58	98,5	100
0,77	0,99	0,466	0,96	1,025	0,724	1,25	1,55	98,0	100
0,80	1,02	0,503	1,00	1,080	0,785	1,25	1,56	98,0	100
0,83	1,66	0,541	1,04	1,120	0,849	1,25	1,57	98,0	100
0,85	1,08	0,581	1,08	1,100	0,910	1,26	1,58	98,5	100
0,90	1,12	0,636	1,08	1,160	0,916	1,20	1,44	94,0	100
0,93	1,15	0,679	1,12	1,200	0,985	1,21	1,45	94,5	100
0,98	1,18	0,724	1,16	1,240	1,057	1,21	1,46	94,5	100
1,00	1,27	0,785	1,25	1,830	1,226	1,25	1,56	98,0	100
1,04	1,31	0,849	1,30	1,380	1,327	1,25	1,56	98,0	100
1,08	1,35	0,916	1,38	1,430	1,431	1,25	1,56	98,0	100
1,12	1,39	0,985	1,40	1,480	1,539	1,25	1,56	98,0	100
1,16	1,43	1,057	1,40	1,480	1,539	1,21	1,46	94,5	100
1,20	1,47	1,131	1,45	1,530	1,851	1,21	1,46	94,5	100
1,25	1,52	1,227	1,50	1,580	1,767	1,20	1,44	94,0	100
1,30	1,57	1,327	1,56	1,640	1,911	1,20	1,44	94,0	100
1,35	1,62	1,431	1,62	1,700	2,061	1,20	1,44	94,0	100
1,40	1,67	1,539	1,68	1,760	2,217	1,20	1,44	94,0	100
1,45	1,72	1,651	1,74	1,820	2,379	1,20	1,44	92,0	100
1,30	1,77	1,767	1,81	1,890	2,573	1,21	1,45	94,5	100
1,56	1,83	1,911	1,81	1,890	2,573	1,16	1,35	91,0	100
1,62	1,89	2,060	1,88	1,960	2,776	1,16	1,35	91,0	100
1,68	1,95	2,220	1,95	2,030	2,986	1,16	1,35	91,0	100
1,74	2,01	2,380	2,02	2,100	3,205	1,16	1,35	91,0	100
1,81	2,08	2,570	2,10	2,190	3,464	1,16	1,35	91,0	100
1,86	2,15	2,780	2,10	2,180	3,464	1,12	1,25	87,5	97
1,95	2,22	2,990	2,25	2,350	4,011	1,16	1,34	91,0	100
2,02	2,29	3,200	2,26	2,350	4,020	1,12	1,25	87,5	97
2,10	2,37	3,460	2,44	2,530	4,680	1,16	1,35	91,0	100

См. примечание к таблице 11.

Таблица 13

Диаметр алюминиевой жилы, мм	Сечение алюминиевой жилы, мм²	Радиальная толщина изоляции, мм	Диаметр изолированного провода, мм	Масса провода кг/км
0,57	0,2552	0,0275	0,625	0,753
0,59	0 2734	0,0275	0,645	0,805
0,62	0,3019	0,0275	0,675	0,885
0,64	0,3217	0,030	0,70	0,998
0,67	0,3526	0,030	0,73	1,030
0,69	0,3739	0,030	0,75	1,125
0,72	0,4072	0,030	0,78	1,19
0,74	0,4301	0,0325	0,805	1,26
0,77	0,4657	0 0325	0,835	1,36
0,80	0,5027	0,0325	0,865	1 46
0,83	0,5401	0,0325	0,895	1,57
0,86	0,5809	0,0325	0,925	1,68
0,90	0,6362	0,0325	0,965	1,84
0,93	0,6793	0,0325	1,995	1,95
0,96	0,7238	0,0325	1,025	2,08
1,00	0,7854	0,040	1,08	2,28
1,04	0,8495	0,040	1,12	2,46
1,08	0,9161	0,040	1,16	2,65
1,12	0,9852	0,040	1,20	2,84
1,16	1,0568	0,040	1,24	3 04
1,20	1,1310	0,040	1,28	3,25
1,25	1,2270	0,040	1,33	3,51
1,30	1,327	0,040	1,38	3,79
1,35	1,431	0,040	1,43	4,08
1,40	1,539	0,040	1,48	4,39
1,45	1,651	0,040	1,53	4,69
1,50	1,767	0,040	1,58	5,02
1,56	1,911	0,040	1,64	5,41
1,62	2,061	0,040	1,80	5 83
1,68	2,217	0,040	1,76	6,26
1,74	2,378	0,040	1,82	6,70
1,81	2,573	0,040	1,89	7,24
1,88	2,776	0,040	1,96	7,80
1,95	2,986	0,040	2,03	8,37
2,02	3,205	0,040	2,10	8,97
2,10	3,464	0,045	2,19	10,1
2,26	4,011	0,045	2,35	11,2

увеличением коэффициента заполнения паза. По сравнению с медными (ПБД и ПЭЛБО) алюминиевые провода более эластичны, изоляция их тоньше. За счет этого коэффициент заполнения паза можно увеличить на 8—10% по сравнению с величинами, указанными в таблице 5 для медных проводов. Некоторое улучшение достигается также применением современных, более тон-

ких и электрически прочных материалов для пазовой изоляции,

изменением типа обмотки — применением однослойной обмотки вместо двухслойной, что позволяет исключить прокладку между сторонами катушек в пазу;

изменением схемы обмотки — уменьшением числа параллельных элементарных проводников в эффективном проводе или числа параллельных ветвей в фазе, чтобы применить элементарные проводники максимально допустимого диаметра *.

После того как указанные мероприятия будут проведены, достаточно увеличить диаметр изолированного алюминиевого провода по отношению к медному на 4—5%. Исходя из этого, составлена таблица 11 замены медного провода ПЭБЛО, применяемого для электродвигателей серии А и АО, на алюминиевый провод ПЭВА-2 (или ПЭЛРА-2).

Аналогично для электродвигателей старых серий, у которых применены медные провода ПБД, составлена таблица 12.

В электродвигателях серии А2 и АО2, где в заводском исполнении применены электроизоляционные материалы и обмоточные провода класса нагревостойкости Е, замена медных проводов алюминиевыми неизбежно связана со снижением мощности электродвигателя на 17—18%.

Характеристики провода ПЭВА-2 (ПЭЛРА-2) приведены в таблице 13.

Пример расчета

Требуется рассчитать электродвигатель для замены медного провода алюминиевым.

Паспортные данные электродвигателя, данные измерений и обмоточные данные статора (медная обмотка)

Мощность, кВт	$P_м = 4{,}5$
Напряжение, В	$U = 220/380$
Ток, А	$I_м = 16{,}3/9{,}4$
Коэффициент полезного действия, %	$\eta_м = 85{,}5\%$

* Максимальный диаметр неизолированного алюминиевого провода для всыпных обмоток — 2,26 мм. Укладка в пазы провода большого диаметра затруднена из-за его жесткости и может привести к повреждению пазовой изоляции

Коэффициент мощности	$\cos\varphi_м = 0{,}85$
Частота вращения (синхронная), об/мин	$n_c = 1500$
Внутренний диаметр сердечника, см	$D_1 = 15{,}2$
Полная длина сердечника, см	$l_1 = 9$
Высота спинки сердечника, см	$h_{c1} = 2{,}45$
Число радиальных вентиляционных каналов	$n_{к1} = 1$
Ширина радиального канала, см	$b_{к1} = 1{,}0$
Ширина зубца (расчетная), см	$b_{з1} = 0{,}7$
Коэффициент заполнения сердечника из стали 0,5 мм, межлистовая изоляция — лак	$k = 0{,}93$
Число пазов	$Z = 36$
Площадь паза, мм²	$Q_{п1} = 206{,}5$
Тип обмотки	Однослойная с концентрическими катушками
Марка обмоточного провода (медного)	ПЭЛБО
Число эффективных проводов в пазу	$w_{эп1м} = 32$
Число элементарных проводников в эффективном проводе	$m_{1м} = 1$
Число параллельных ветвей в пазу обмотки	$a_м = 1$
Диаметр неизолированного элементарного проводника, мм	$d_м = 1{,}62$
Диаметр изолированного элементарного проводника, мм	$d_{им} = 1{,}83$
Сечение неизолированного элементарного проводника, мм²	$q_{1м} = 2{,}06$
Сечение изолированного элементарного проводника, мм²	$q_{и1м} = 2{,}62$

Расчет

Число полюсов электродвигателя (по формуле 2)

$$2p = 6000/1500 = 4$$

Полюсное деление статора (по формуле 4)

$$\tau_1 = 3{,}14 \cdot 15{,}2/4 = 11{,}95 \text{ см}.$$

Зубцовый шаг (по формуле 5)

$$t_1 = 3{,}14 \cdot 15{,}2/36 = 1{,}32 \text{ см}.$$

Активная длина сердечника (по формуле 6)

$$l_{a1} = 0{,}93\,(9{,}0 - 1 \cdot 1{,}0) = 7{,}44 \text{ см}$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = 36/(6 \cdot 2) = 3$$

Обмоточный коэффициент (табл 6) $k_{o1м}=0,96$
Индукция в воздушном зазоре (по формуле 8) при обмотке из медного провода

$$B_{\delta м}=2,5\cdot 2\cdot 220\ 10^2/(9,0\ 36\ 15,2\ 32\cdot 0,96)=0,73\ Т.$$

Индукция в зубцах статора (формула 12)

$$B_{з1м}=0,73\ 1,32\ 9,0/(0,7\cdot 7,44)=1,66\ Т.$$

Индукция в спинке статора (по формуле 13)

$$B_{c1м}=0,55\cdot 0,73\cdot 15,2\cdot 9,0\ 1/(2,45\ 7,44\cdot 2)\ \ 1,51\ Т$$

Плотность тока (по формуле 14)

$$j_{м}=9,4/(2,06\ 1\ 1)=4,56\ А/мм^2.$$

Линейная нагрузка (по формуле 17)

$$A_{1м}=9,4\cdot 36\ 32/(3,14\cdot 15,2\ 1)=227\ А/см$$

Произведение $j_{1м}A_{1м}=4,56\cdot 227=1040$ $А^2/(мм^2\cdot см)$.
Коэффициент заполнения паза (по формуле 18)

$$K_{1м}=32\ 2,62/206,5=0,405$$

Из расчета следует, что при обмотке статора, выполненной из медного провода, индукции в воздушном зазоре, спинке и зубцах статора имеют предельные значения (табл 5) Поэтому при замене медного провода алюминиевым нельзя уменьшить число эффективных проводов в пазу — это вызовет соответствующее увеличение индукций Также не следует стремиться увеличивать коэффициент заполнения паза; при диаметре провода, близком к предельно допустимому, это может вызвать повреждение изоляции при укладке проводов в пазы Линейная нагрузка и фактор нагрева (произведение $j_{1м}A_{1м}$), если есть необходимость, могут быть повышены

При переходе на алюминиевую обмотку, сохраняя такими же, как при медной обмотке, число эффективных проводов в пазу, число элементарных проводников в эффективном проводе, число параллельных ветвей в фазе обмотки и коэффициент заполнения паза, оставляют неизменным диаметр изолированного алюминиевого элементарного проводника $d_{и1а}=d_{и1м}=1,83$ мм

Для алюминиевого провода ПЭВА 2 или ПЭЛРА-2 двухсторонняя толщина изоляции (табл 13) составляет 0 08 мм, т е $d_{1а}=1,83-0,08=1,75$ (округляется до ближайшего стандартного размера — 1,74 мм)

Сечение элементарного алюминиевого проводника $q_{1а}=2,378$ мм²

Согласно данным таблицы, допустимая плотность тока для электродвигателей мощностью 1—10 кВт с медной обмоткой статора составляет 5 6 А/мм² При алюминиевой обмотке плотность тока должна быть снижена на 10 20% Принимая $j_{1а}=4$ А/мм², получим фазовый ток $I_{ф1а}$ 4·2,378=9,512 А.

Отношение мощностей электродвигателя с медной и алюминиевой обмотками составит $P_м/P_а=I_{ф1м}/I_{ф1а}=9,4/9,512=0,99$, т е. при замене медного провода обмотки статора на алюминиевый мощность электродвигателя практически сохраняется.

РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ ПАЗА

При ремонте электродвигателей старых выпусков коэффициент заполнения паза медью можно увеличить, применив обмоточные провода с более тонкой изоляцией и выполнив изоляцию паза из современных более тонких материалов

Естественно, если мы увеличиваем сечение проводов, заложенных в паз, повышаются ток и мощность электродвигателя.

Когда мощность увеличивается, необходимо учитывать, что отношение максимального вращающего момента к номинальному — величина, нормируемая действующим ГОСТом на электрические машины

Так как момент вращения электродвигателя связан с его мощностью соотношением $M_{ном} = 975\,P/n$ кГм, то при увеличении мощности электродвигателя пропорционально увеличивается его номинальный момент, а для сохранения соотношения максимального и номинального моментов необходимо повысить $M_{макс}$.

Следует оговориться, что некоторые электродвигатели имеют запас в части кратности $M_{макс}/M_{ном}$ Если же этого запаса нет, его следует обеспечить, изменив обмоточные данные электродвигателя.

Увеличение $M_{макс}$ возможно при повышении индукции в воздушном зазоре, причем $M_{макс}$ растет пропорционально квадрату индукции в воздушном зазоре

Как следует из формулы (8), повышение индукции в воздушном зазоре может быть только за счет уменьшения числа эффективных проводов в пазу Это влечет за собой увеличение потерь в стали Но уменьшение числа проводов в пазу позволяет дополнительно увеличить их сечение (помимо увеличения сечения за счет повышения коэффициента заполнения паза) и тем самым снизить потери в обмотке.

Н. М Слонимом [14] установлено, что сохранение кратности максимального и номинального моментов, а также сохранение кратности суммарных потерь при увеличении коэффициента заполнения паза статора медью * может быть при следующем соотношении

* Коэффициент заполнения паза медью определяется как отношение площади сечения всех неизолированных проводов, заложенных в паз, к площади паза

новой и старой мощности и номинального тока электродвигателя

$$\varphi = P_н/P_с = I_{ф1н}/I_{ф1с} = 0{,}7b + 0{,}3, \qquad (51)$$

где b — отношение коэффициентов заполнения паза медью,

$$b = K_{м1н}/K_{м1с} \text{ или } \varphi - 1 = 0{,}7(b-1), \qquad (52)$$

т. е. каждому проценту увеличения коэффициента заполнения паза медью соответствует 0,7% увеличения мощности электродвигателя.

Здесь и далее к обозначениям, относящимся к старому исполнению, добавляется индекс «с» и к новому исполнению — индекс «н».

При указанном увеличении мощности следует число эффективных проводников в пазу уменьшить в соотношении

$$w_{эп1н}/w_{эп1с} = 1/\sqrt{0{,}7b + 0{,}3}, \qquad (53)$$

а сечение эффективного провода увеличить

$$Q_{эп1н}/Q_{эп1с} = b\sqrt{0{,}7b + 0{,}3}. \qquad (54)$$

При этих изменениях плотность тока в обмотке уменьшится

$$j_{1н}/j_{1с} = \sqrt{0{,}7b + 0{,}3}/b, \qquad (55)$$

а линейная нагрузка и индукция в зазоре увеличатся

$$A_{1н}/A_{1с} = B_{\delta н}/B_{\delta с} = \sqrt{0{,}7b + 0{,}3} \qquad (56)$$

Также уменьшится произведение плотности тока на линейную нагрузку

$$j_{1н}A_{1н}/(j_{1с}A_{1с}) = (0{,}7b + 0{,}3)/b. \qquad (57)$$

Практически увеличение коэффициента заполнения паза статора медью может изменяться от 1,1 до 1,5. Для этих значений указанные выше соотношения сведены в таблицу 14.

Если оставить потери на прежнем уровне и одновременно увеличить номинальную мощность электродвигателя, его к.п.д. возрастет, коэффициент мощности несколько уменьшится.

Если при перерасчете электродвигателя индукция в воздушном зазоре превзойдет предельную величину, ука-

занную в таблице 5, ее следует снизить до допустимой и, исходя из этой сниженной индукции, рассчитать все соотношения, приведенные в таблице 14

В качестве конкретного примера модернизация электродвигателя при изменении коэффициента заполнения паза медью можно привести результаты перемотки электродвигателя мощностью 14 кВт, напряжением 220/380 В, при которой мощность электродвигателя была увеличена до 17 кВт

Параметры электродвигателя в заводском исполнении следующие

Число эффективных проводов в пазу	$w_{эп.} = 32$
Число параллельных ветвей в фазе	$a = 2$
Число элементарных проводников в эффективном проводе	n, 2
Диаметр элементарного проводника без изоляции, мм	$d_1 = 1{,}36$
Марка изоляции провода	ПЭЛБО
Двухсторонняя толщина изоляции, мм	$\Delta = 0{,}21$
Диаметр изолированного элементарного провода, мм	$d_{и1} = 1{,}51$
Толщина пазовой изоляции, мм	0,6
Коэффициент заполнения паза медью	$K_{м1} = 0{,}29$

При ремонте оставлены без изменения схема обмотки, число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе. Были изменены,

число элементарных проводников в пазу (вместо 64 проводников было уложено 60) Это уменьшение вполне целесообразно, так как величина индукции в стали в заводском исполнении не была предельной и ее увеличение на 7% вполне допустимо,

толщина пазовой изоляции (вместо изоляции 0,6 мм на сторону установлена изоляция 0,3 мм за счет применения современных, более тонких изоляционных материалов с повышенной электрической прочностью);

марка и размер провода — взамен ПЭЛБО, у которого двухсторонняя толщина изоляции 0,21 мм, применен провод ПЭВ 2 с двухсторонней толщиной изоляции 0,11 мм Диаметр неизолированного провода увеличен до 1,45 мм, и соответственно этому диаметр изолированного провода составил 1,56 мм.

Так как число проводников, закладываемых в паз, уменьшено и пазовая изоляция заменена на более тонкую, незначительное увеличение диаметра изолированного провода вполне допустимо.

В результате модернизации коэффициент заполнения паза медью повысился до 0,38 и его отношение к коэффициенту заполнения паза в заводском исполнении $b = 0{,}38/0{,}29 = 1{,}31$.

При указанном соотношении этих коэффициентов, по данным таблицы 14, увеличение номинальной мощности составляет 22%, т е мощность электродвигателя после модернизации равна 17 кВт.

Таблица 14

Соотношение	Расчетная формула	Величина соотношения при b равном								
		1,1	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,5
$P_н/P_с$; $I_{ф1н}/I_{ф1с}$	$0{,}7b+0{,}3$	1,07	1,105	1,14	1,175	1,21	1,245	1,28	1,315	1,35
$w_{эп1н}/w_{эп1с}$	$1/\sqrt{0{,}7b+0{,}3}$	0,97	0,955	0,94	0,925	0,91	0,90	0,88	0,87	0,86
$Q_{эп1н}/Q_{эп1с}$	$b/\sqrt{0{,}7b+0{,}3}$	1,14	1,21	1,28	1,36	1,43	1,50	1,58	1,66	1,74
$j_{1н}/j_{1с}$	$\sqrt{0{,}7b+0{,}3}/b$	0,94	0,915	0,890	0,875	0,850	0,825	0,805	0,790	0,775
$A_{1н}/A_{1с}$; $B_{δн}/B_{δс}$	$\sqrt{0{,}7b+0{,}3}$	1,035	1,05	1,07	1,085	1,10	1,115	1,13	1,145	1,16
$j_{1н}A_{1н}/(j_{1с}A_{1с})$	$(0{,}7b+0{,}3)/b$	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,922	0,915	0,905	0,900

РАСЧЕТ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ

Общие сведения

Как уже говорилось, расчет для определения (восстановления) обмоточных данных проводится тогда, когда в ремонт поступает электродвигатель без паспортного щитка, а обмотка либо демонтирована, либо повреждена в такой степени, что невозможно определить и при ремонте сохранить ее параметры Также может быть, что обмотка электродвигателя не заводского исполнения и нет уверенности в ее технической правильности

В подобных случаях следует проверить, нет ли в альбомах обмоточных данных такого электродвигателя, геометрические и конструктивные размеры которого совпадают с данными ремонтируемого электродвигателя, и, если по альбомам не будет установлен паспорт электродвигателя, определить обмоточные данные расчетным путем на основании снятых с натуры размеров, руководствуясь указаниями по допустимым электромагнитным нагрузкам (табл 5) Требуемое напряжение и частоту вращения заказчик должен оговорить в задании на ремонт.

При этих условиях складывается такая последовательность расчета.

1 Проверяют задание заказчика по частоте вращения В начальной стадии расчета проверка предварительная, число полюсов электродвигателя, при котором оптимально используются его активные материалы, а также достигаются максимальная надежность и долговечность, уточняется в ходе дальнейшего расчета

Если в формулу (13) подставить из таблицы 5 средние значения индукции в воздушном зазоре и спинке статора, то примерная зависимость числа полюсов электродвигателя от внутреннего диаметра и высоты спинки выразится таким соотношением:

$$2p \cong 0{,}6 D_1 / h_{c1}. \qquad (58)$$

Напомним, что полученный результат округляется до ближайшего целого четного числа.

Сопоставляя данные электродвигателей равной мощности, но с разной частотой вращения, можно заметить,

что сравнительно большая спинка статора свидетельствует о малом числе полюсов, а малая высота спинки — о большом числе полюсов электродвигателя.

В электродвигателях мощностью до 100 кВт можно установить следующую зависимость между отношением $D_{н}/D_{I}$ и числом полюсов, что также косвенно характеризует высоту спинки:

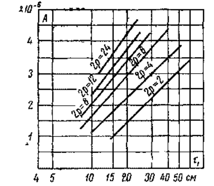


Рис 24 Постоянная мощность A в зависимости от полюсного деления τ_1.

Число полюсов . . .	2	4	6	8 и 10
$D_{н}/D_{I}$	1,75—1,95	1,50—1,70	1,40— 1,50	1,30—1,40

Здесь же следует оговориться, что в серийных электродвигателях, например А и АО, из производственных соображений (чтобы экономить на вырубке листов стали штампом) при одних и тех же диаметрах могут быть различные числа полюсов, например 4 и 6, 6 и 8, 8 и 10.

Для электродвигателей с короткозамкнутым ротором дополнительным признаком служит сопоставление предполагаемого числа полюсов с числом пазов статора и ротора согласно формуле (19).

2. Определяют полюсное деление и полезную мощность электродвигателя, кВт:

$$P - AD_1{}^2 l_1 n_c, \qquad (59)$$

где A — коэффициент использования (постоянная мощности), значения которого в зависимости от полюсного деления τ_1 приведены на рисунке 24.

Мощность электродвигателя, определенная по приведенной формуле, приближенная. Ее вычисляют только для пользования при расчетах данными таблицы 5, где допустимые электромагнитные нагрузки указаны в зависимости от мощности электродвигателя.

3. В соответствии с размерами статора и ротора электродвигателя, а также заданным и проверенным числом полюсов находят:

зубцовый шаг статора, $t_{з1}$ (по формуле 5);
зубцовый шаг ротора, $t_{з2}$ (по формуле 20);
активную длину сердечника стали статора, l_{a1} (по формуле 6),
активную длину сердечника стали ротора, l_{a2} (по формуле 21),
площадь паза статора, $Q_{п1}$ } по фактическим размерам паза или по рисунку 1;
площадь паза ротора, $Q_{п2}$ }
расчетную ширину зубца статора $b_{з1}$ (по формуле 7);
расчетную ширину зубца ротора, $b_{з2}$ (по формуле 22).

4. Руководствуясь таблицей 5 и сообразуясь с ориентировочной мощностью электродвигателя, задаются величиной индукции в воздушном зазоре, вычисляют индукции в зубцах статора по формуле (12), в спинке статора по формуле (13), в зубцах ротора по формуле (23) и в спинке ротора по формуле (24)

Задавшись максимальным значением B_δ, начинают расчет (в табл 5 для каждой мощности указаны предельные — максимальное и минимальное — значения индукции) Целесообразность этого следует из содержания формулы (8); увеличение B_δ влечет за собой пропорциональное уменьшение числа эффективных проводов в пазу, что, в свою очередь, позволяет увеличить сечение каждого эффективного провода и тем самым повысить допустимый ток и мощность электродвигателя.

Однако чрезмерная величина индукции в зазоре может привести к недопустимым индукциям в активной стали электродвигателя, увеличению намагничивающего тока, возрастанию потерь и снижению коэффициентов мощности и полезного действия электродвигателя При очень больших индукциях конструктивные детали в спинке статора сильно нагреваются В таких случаях предварительно выбранную максимальную величину индукции в зазоре надо снизить так, чтобы значения сопряженных с ней индукций на других участках магнитной цепи электродвигателя находились в допустимых пределах.

Следует отметить, что с повышением индукции возрастают пусковой и максимальный моменты вращения, что положительно

Занижение индукции влечет за собой уменьшение пускового и максимального моментов вращения, а также снижение мощности и коэффициента полезного действия электродвигателя. Это объясняется тем, что снижается индукция, когда увеличивается число эффективных проводов в пазу, а значит, уменьшается их сечение.

Чтобы величина индукции отремонтированного двигателя была близка к заложенной при конструировании, следует задаться 2 3 вариантами индукции. Если при различных значениях B_δ не удается добиться требуемых результатов, значит, заказ на данную частоту вращения неправилен. Вот почему при неудовлетворительных результатах подсчета индукции следует повторить расчеты при другом, скорректированном числе полюсов.

Если при допустимом значении индукции в зазоре получаются завышенные индукции в спинке статора, рекомендуется повторить расчет, увеличив число полюсов (тем самым разгружается спинка). Если же индукция B_{c1} значительно меньше указанной в таблице 5, число полюсов следует уменьшить.

Несколько завышенная, а тем более заниженная индукция в спинке ротора при допустимых значениях индукции на других участках магнитопровода не может служить окончательным признаком, что B_δ выбрана неправильно, так как иногда заводы-изготовители по условиям производства могут выпускать электродвигатели с несколько завышенной или заниженной индукцией в спинке ротора.

5 Выбирают тип обмотки для статора и для ротора

В асинхронных двигателях малой и средней мощности для статоров применяют однослойную обмотку с концентрическими катушками, двухслойную и однослойную цепные обмотки. В электродвигателях высокой мощности используют главным образом двухслойные обмотки, реже однослойные с концентрическими катушками.

В электродвигателях серии А2 и АО2 мощностью от 0,6 до 100 кВт, составляющих, как это указывалось, основной ремонтный фонд предприятий сельского хозяйства, для обмоток статора применена однослойная обмотка во всех электродвигателях 1-го и 2-го габаритов, а также в электродвигателях типа АО2 — 3-го и 4-го габаритов; для всех остальных электродвигателей серии

применена двухслойная обмотка. В электродвигателях серии А и АО 3-го и 4-го габаритов и для 4 и 6-полюсных электродвигателей 5-го габарита — однослойная обмотка, во всех остальных электродвигателях этой серии — двухслойная обмотка. При ремонте электродвигателей названных серий целесообразно сохранить указанные типы обмоток статора

Если ремонтируются электродвигатели старых типов и серий, а также поступившие в ремонт с демонтированной обмоткой, при выборе вида обмотки следует руководствоваться следующими соображениями

У двухслойных обмоток существенные преимущества перед однослойными расход обмоточных проводов на 10—15% меньше, форма кривой НС обмотки приближается к синусоидальной, что в связи с меньшим активным и индуктивным сопротивлением обмотки повышает коэффициенты полезного действия и мощности. Двухслойные обмотки (стр 38) выполнимы при q_1 любой дробности, что также очень важно. Зато у однослойных обмоток коэффициент заполнения паза медью выше, чем у двухслойных: нет прокладок между верхними и нижними сторонами катушек, заложенных в пазы

С учетом того, что укорочение шага связано с увеличением числа эффективных проводов в пазу, применение однослойной обмотки для мелких электродвигателей может дать большую мощность, чем при двухслойной обмотке.

Для всыпных обмоток статора трудоемкость укладки однослойных обмоток меньше, кроме тех случаев, когда применяют провод большого (предельно допустимого) диаметра; отгибать лобовые части здесь легче у двухслойных, чем у однослойных катушек, потому что двухслойная в два раза меньше.

Обмотку ротора выбирают к электродвигателям с фазовыми роторами. Короткозамкнутые роторы вообще не ремонтируются, а если в этом все-таки есть необходимость, то тип его обмотки совершенно определен.

Наиболее распространены фазовые роторы с трехфазной двухслойной стержневой волновой обмоткой с двумя стержнями в пазу Эти обмотки обычно с диаметральным шагом и целым числом пазов на полюс и фазу q_2 или реже с нецелым числом q_2, но с его дробной частью, равной $^1/_2$ Соединение фаз чаще всего выполнено звездой.

Как уже говорилось, каждый стержень (полусекция) может состоять либо из одного массивного провода прямоугольного или специального профиля, либо подразделяться на несколько параллельных проводов для роторов больших токов.

Если обмотки стержневые, пазы ротора обычно закрыты или в них сделан небольшой шлиц. Когда пазы закрыты, обмотку выполняют также протяжной, с однослойными концентрическими катушками из круглого провода. Роторы этого вида устарели и ремонтируются теперь редко В тех же роторах, где пазы со шлицами, применяют всыпные обмотки, чаще всего с однослойными и реже с двухслойными катушками из круглого провода.

Массовое применение для роторов нашли двухслойные обмотки в электродвигателях с открытыми пазами единой серии типа АК мощностью до 100 кВт.

После выбора типа обмотки статора вычисляют шаг обмотки:

при однослойной обмотке — диаметральный

$$y_{п1}=Z_1/(2p)$$

и при двухслойной — укороченный

$$y_{п1}=\beta_1 Z_1/(2p).$$

Здесь β_1 — коэффициент укорочения (обычно от 0,75 до 0,85)

По таблице 6 находят обмоточный коэффициент для статора k_{01}. Аналогично для фазового ротора вычисляют значение k_{02}.

6. Определяют на основании формулы (8) число эффективных проводов в пазу статора·

$$w_{эп1}=10^2\cdot 2{,}5U_{ф1}pa_1/B_\delta Z_1 D_1 l_1 k_{01}) \qquad (60)$$

В формуле (60), помимо выбранных по соображениям, указанным в пункте 4 данного расчета, индукции B_δ, числа полюсов, числа пазов и размеров сердечника статора, участвует также величина a_1 — число параллельных ветвей в фазе обмотки статора

Разбивка обмотки фазы на параллельные ветви и, как дальше будет указано, разбивка эффективного провода в пазу на элементарные проводники необходимы в том случае, когда провод такого размера, что не проходит в шлиц паза.

Определяя числа параллельных ветвей в каждой фазе обмотки статора и элементарных проводников в эффективном проводе, заложенном в паз, надо руководствоваться следующим

при заданном сечении эффективного провода стремиться применить один провод или несколько проводов максимально допустимого сечения. Максимальный диаметр провода (без изоляции) не должен превышать для обмоток из медного провода 1,81 мм, для обмоток из алюминиевого провода — 2,26 мм;

диаметр изолированного провода должен быть на 0,6 0,8 мм меньше размера шлица паза Иначе изоляция провода при укладке может повредиться

Число параллельных ветвей в фазе не может быть произвольным (см. стр 41—45) Для практических целей при выборе числа параллельных ветвей для электродвигателей мощностью до 1000 кВт можно пользоваться таблицей 15.

Таблица 15

Вид обмотки	Рекомендуемое число параллельных ветвей при числе полюсов электродвигателя					
	2	4	6	8	10	12
Двухслойная	1	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 4	1, 2, 5	1, 2, 3, 4, 6
Однослойная	1	1, 2	1, 3	1, 2, 4	1, 5	1, 2, 3, 6

В электродвигателях малой и средней мощности различно стремятся выполнить обмотку с $a_1=1$ и m_1-1, причем в электродвигателях малой мощности это условие обычно получается автоматически.

Число эффективных проводов в пазу ротора принимают, исходя из допустимой величины напряжения между кольцами. Для наиболее употребительных двухслойных стержневых волновых обмоток, как указывалось, $w_{эп2}-2$

7. Определяют сечение и диаметр изолированного, а также неизолированного элементарного проводника обмотки статора:

$$q_{э1}=KQ_{п1}/n_1-KQ_{п1}/(m_1 w_{эп1}),$$

где n — общее число элементарных проводников в пазу.

Число элементарных проводников в эффективном проводе предопределено числом параллельных ветвей в

фазе обмотки — a_1, чем больше a_1, тем соответственно меньше m_1. Следует учитывать, что с уменьшением m_1 повышается коэффициент заполнения паза медью. Поэтому $q_{п1}$, а следовательно, и $d_{п1}$ надо определять при 2—3 вариантах числа m_1 и выбрать тот вариант, при котором $d_{п1}$ будет ближе к максимально допустимому.

Диаметр изолированного элементарного проводника обмотки статора

$$d_{п1} = 1{,}13\sqrt{q_{п1}}.$$

Диаметр неизолированного элементарного проводника

$$d_1 = d_{п1} - \Delta,$$

где Δ — двухсторонняя толщина изоляции

Диаметры обмоточных проводов стандартизированы (табл. 16), толщина изоляции указана в таблице 17.

Таблица 16

Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм²	Масса провода, кг	Сопротивление 1 км провода при 20°С, Ом
0,11	0,00950	0,0845	1849
0,12	0,01131	0,1005	1552
0,13	0,01327	0,1180	1322
0,14	0,01539	0,1368	1140
0,15	0,01767	0,1571	993
0,16	0,0201	0,1788	873
0,17	0,0227	0,202	773
0,18	0,0255	0,226	688
0,19	0,0284	0,252	618
0,20	0,0314	0,279	559
0,21	0,0346	0,308	507
0,23	0,0415	0,369	423
0,25	0,0491	0,436	358
0,27	0,0573	0,509	306
0,29	0,0661	0,587	265
0,31	0,0755	0,671	233
0,33	0,0855	0,760	205
0,35	0,0962	0,855	182,4
0,38	0,1134	1,008	154,8
0,41	0,1320	1,173	132,9
0,44	0,1521	1,352	115,4
0,47	0,1735	1,542	101,2
0,49	0,1886	1,676	98,1
0,51	0,204	1,816	86,0
0,53	0,221	1,961	79,4
0,55	0,238	2,11	73,7
0,57	0,255	2,27	68,8
0,59	0,273	2,43	64,3

Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм²	Масса провода, кг	Сопротивление 1 км провода при 20° С, Ом
0,62	0,302	2,68	58,1
0,64	0,322	2,86	54,5
0,67	0,353	3,13	49,7
0,69	0,374	3,32	46,9
0,72	0,407	3,62	43,1
0,74	0 430	3,82	40,8
0,77	0,466	4,14	37,7
0,80	0 503	4,47	34,9
0,83	0,541	4,81	32,4
0 86	0,581	5,16	30,2
0 90	0,636	5,66	27,6
0,93	0,679	6,04	25,9
0,96	0,724	6,43	24,3
1,00	0,785	6,98	22,4
1,04	0 849	7,55	20,7
1,08	0,916	8,14	19,2
1,12	0,985	8,75	17,82
1,16	1,057	9,40	16,61
1,20	1,131	10,05	15,52
1,25	1,227	10,91	14,33
1,30	1,327	11,80	13,22
1,35	1,431	12,73	12,28
1,40	1,539	13,68	11,40
1,45	1,651	14,68	10,62
1,50	1,767	15,71	9,93
1,56	1,911	16,99	9,18
1,62	2,06	18,32	8,52
1,68	2 22	19,71	7,90
1,74	2,38	21,1	7,37
1,81	2,57	22,9	6,83
1,88	2,78	24,7	6,31
1,95	2,99	26,5	5,88
2,02	3,20	28,5	5,49
2 10	3,46	30,8	5,07
2,26	4,01	35,7	4,88

Если нет провода требуемого размера, его приходится заменять двумя проводами, эквивалентными по суммарному сечению. Для этого следует пользоваться таблицей 18. Однако надо учесть, что такая замена всегда ухудшает коэффициент заполнения паза.

8. Выбирают по таблице 5 три варианта плотности тока в обмотке статора j_1. Для каждого варианта определяют фазовый ток статора (по формуле 14), линей-

ную нагрузку (по формуле 17) и вычисляют произведение j_1A_1. Из принятых вариантов j_1 выбирают тот, при котором A_1 и j_1A_1 будет соответствовать значениям, указанным в таблице 5.

Если при всех вариантах j_1 величины A_1 и j_1A_1 будут превосходить допустимые, следует снизить j_1 в такой степени, чтобы значения A_1 и j_1A_1 были близки к максимальным значениям таблицы 5.

Заниженное значение A_1 и jA_1 указывает, что электродвигатель недостаточно использован; плотность тока следует повысить так, чтобы значения A_1 и j_1A_1 находились в пределах хотя бы минимальных значений таблицы 5.

9. Вычисляют фазовый ток ротора по формуле (29) и определяют плотность тока по формуле (30).

Если значение j_2 превышат допустимое (табл. 5), следует снизить $I_{\text{ф}1}$ до такой степени, чтобы значение j_2 уложилось в установленные пределы.

Для короткозамкнутых роторов со сварной медной или латунной беличьей клеткой вычисляют токи в стержне по формуле (32) и в короткозамыкающем торцевом кольце — по формуле (33).

Если обмотка короткозамкнутого ротора демонтирована, размеры и форму стержней восстанавливают по форме паза, а сечение короткозамыкающего кольца определяют из соотношения.

$$Q_{\text{к}} = I_{\text{к}}/j_{\text{к}},$$

где $I_{\text{к}}$ и $j_{\text{к}}$ — ток и плотность тока в короткозамыкающем кольце.

Размеры короткозамыкающего кольца выбирают с таким расчетом, чтобы возникающие в них механические напряжения при вращении, определяемые формулами (35) и (36), не превышали допустимые величины.

10. Определяют номинальную мощность электродвигателя (мощность на валу) из формулы (15) — при соединении фаз в звезду или из формулы (16) - при соединении фаз в треугольник. Значения η и $\cos\varphi$ подбирают по одной из таблиц 7 10.

Пример расчета

Требуется произвести расчет электродвигателя, поступившего в ремонт без заводского паспорта, с демонтированной обмоткой для определения его обмоточных данных и мощности

Таблица 17

Марка провода	Изоляция провода	Двухсторонняя толщина изоляции (мм) при диаметре неизолированного провода, мм										
		0,05—0,09	0,10—0,19	0,20—0,25	0,27—0,29	0,31—0,35	0,38—0,49	0,51—0,69	0,72—0,96	1,00—1,45	1,50—2,1	2,26
ПЭЛ	Изолирован лакостойкой эмалью	—	0,02	0,025	0,04	0,04	0,04—0,05	0,05	0,06	0,07—0,08	0,06—0,10	—
ПЭЛУ	То же, но с утолщенной изоляцией	—	0,085	0,04	0,06	0,06	0,06—0,07	0,07	0,08—0,09	0,10—0,11	0,11—0,13	—
ПЭВ-1	Изолирован одним слоем эмали винифлекс	0,025	0,025—0,03	0,03—0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05—0,06	0,06	0,06—0,10	—
ПЭВ-2	То же, но изолирован двумя слоями эмали	0,03	0,05—0,04	0,04—0,05	0,05	0,05—0,05	0,06	0,07—0,08	0,08—0,09	0,11	0,11—0,13	—
ПЭЛР-1	Изолирован одним слоем эмали на полиамиднорезольном лаке	—	0,02—0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08	0,09	—
ПЭЛР-2	То же, но изолирован двумя слоями эмали	—	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	—
ПЭЛШО	Изолирован лакостойкой эмалью и одним слоем натурального шелка	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	—
ПЭЛШКО	Изолирован лакостойкой эмалью и одним слоем шелка капрон	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	—
ПЭЛБО	Изолирован лакостойкой эмалью и одним слоем хлопчатобумажной пряжи	—	—	0,125	0,155	0,16	0,105	0,17	0,18	0,21	0,21	—

ПЭЛКО	Изолирован лакостойкой эмалью и утолщенным слоем шелка капрон	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	—
ПЭЛБД	Изолирован лакостойкой эмалью и двумя слоями хлопчатобумажной пряжи	—	—	—	—	—	—	—	0,28	0,33	0,33	—
ПБО	Изолирован одним слоем хлопчатобумажной пряжи	—	—	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14	—
ПБД	То же, но изолирован двумя слоями пряжи	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27	0,27	0,33
ПЭТСО	Изолирован нагревостойкой эмалью и одним слоем бесщелочного стекловолокна	—	—	—	—	0,20	0,20	0,20	0,22	0,22	0,22—0,24	—
ПСД	То же, но изолирован двумя слоями стекловолокна	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,27	0,33
ПДА	Изолирован одним слоем асбестовой ровницы с подклейкой нагревостойким лаком	—	—	—	—	—	—	—	—	0,30	0,30	0,35
ПЭВА-1	Изолирован аналогично проводу ПЭВ-1	—	—	—	—	—	—	0,045	0,045—0,05	0,07	0,07—0,085	—
ПЭЛРА-1	Изолирован аналогично проводу ПЭЛР-1	—	—	—	—	—	—	0,045	0,045—0,05	0,07	0,07—0,08	—
ПЭВА-2	Изолирован аналогично проводу ПЭВ-2	—	—	—	—	—	—	0,055—0,06	0,06—0,065	0,08	0,08—0,06	—
ПЭЛРА-2	Изолирован аналогично проводу ПЭЛР-2	—	—	—	—	—	—	0,055—0,06	0,06—0,065	0,08	0,08—0,09	—
АПСД	Изолирован аналогично проводу ПСД	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,25	0,30

Таблица 16

d, мм	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,56	1,62	1,68	1,74	1,81	1,88	1,95	2,02	2,1	2,36
0,44	0,9	—	1,0	1,04	1,06	1,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,47	—	0,93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,49	—	—	—	—	—	—	1,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,51	0,86	—	0,96	1,0	—	—	—	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,53	—	0,9	—	—	1,04	1,08	—	—	1,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,55	0,83	—	0,93	—	—	—	1,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,57	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,59	0,8	0,86	0,9	0,96	1,0	1,04	—	1,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,62	0,77	0,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,64	—	—	0,86	0,93	0,96	—	1,08	—	1,2	1,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,67	0,74	0,8	—	—	—	1,0	—	1,12	—	—	1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,69	0,72	0,77	0,83	0,9	0,93	—	1,04	—	1,16	—	—	1,35	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,72	0,69	0,74	0,8	0,86	—	0,96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,74	—	0,72	—	0,83	0,9	—	—	1,08	1,12	1,2	1,25	—	—	1,45	1,5	—	—	—	—	—	—	—
0,77	—	—	0,77	0,8	0,86	0,93	1,0	—	—	—	—	1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,8	—	—	—	0,77	0,83	0,9	0,96	1,04	—	1,16	—	—	1,35	1,4	—	1,56	—	—	—	—	—	—
0,83	—	—	—	—	0,8	0,86	0,93	1,0	1,08	1,12	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,86	—	—	—	—	—	0,93	0,9	0,96	1,04	—	1,16	1,25	1,3	—	1,45	—	—	—	—	—	—	—
0,9	—	—	—	—	—	—	0,86	—	1,00	1,08	—	—	—	1,35	—	1,5	—	—	1,74	—	—	—
0,93	—	—	—	—	—	—	—	0,93	—	1,04	1,12	1,2	1,25	—	—	—	1,56	1,68	—	—	—	—

0,96	—	—	—	—	—	—	—	—	0,96	1,00	1,08	1,16	—	1,3	1,4	1,45	—	—	—	—	—	—
1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,96	1,04	1,12	1,2	—	—	—	1,5	—	1,68	—	—	—
1,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,0	1,08	1,16	1,25	—	1,4	—	1,62	1,62	1,74	—	2,02
1,08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,04	1,12	1,2	1,3	1,35	1,45	—	—	—	1,81	—
1,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,08	1,16	1,25	—	—	1,56	—	1,68	—	—
1,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,12	—	1,3	1,4	—	1,56	—	—	1,95
1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2	1,25	1,35	1,5	—	1,62	1,74	1,88
1,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2	1,3	1,45	1,5	—	1,68	—
1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,25	1,4	1,45	1,56	—	—
1,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,35	1,4	1,5	1,62	1,81
1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,35	1,45	1,56	—
1,45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,4	1,5	1,74
1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,45	1,68
1,56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,62
1,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. При замене провода, диаметр которого указан в верхнем горизонтальном ряду, двумя другими один берется из вертикального столбца под данным диаметром, второй — по горизонтали влево от него в первом вертикальном столбце. Например: провод Ø1,3 мм заменяется проводами Ø1,2+Ø0,51, или Ø1,16+Ø0,59, или Ø1,12+Ø0,67 мм и т. д.

Техническое задание. Электродвигатель предназначается для работы при напряжении 220/380 В и частоте вращения 1000 об/мин

Данные измерений

Наружный диаметр сердечника статора, см	$D_{н1}=23{,}1$
Внутренний диаметр сердечника статора, см	D_1 14,5
Наружный диаметр сердечника ротора, см	$D_{н2}=14{,}42$
Полная длина сердечника статора, см	$l_1=23{,}5$
Полная длина сердечника ротора, см	$l_2=24{,}2$
Число радиальных вентиляционных каналов сердечника статора	$n_{к1}=2$
Число радиальных вентиляционных каналов сердечника ротора	$n_{к2}=2$
Ширина радиального канала сердечника статора, см	$b_{к1}=1$
Ширина радиального канала сердечника ротора, см	$b_{к2}=1$
Высота спинки сердечника статора, см	$h_{c1}=2{,}8$
Высота спинки сердечника ротора, см	$h_{c2}=2{,}6$
Ширина зубца статора в самом узком месте, см	$b'_{з1}=0{,}6$
Ширина зубца статора в самом широком месте, см	$b''_{з1}=0{,}84$
Ширина зубца ротора в самом узком месте, см	$b'_{з2}=0{,}9$
Ширина зубца ротора в самом широком месте, см	$b''_{з2}=1{,}2$
Толщина листов стали сердечников 0,5 мм, межлистовая изоляция лак	$k=0{,}93$
Число пазов статора	$Z_1=36$
Число пазов ротора	$Z_2=26$
Площадь паза статора, мм²	$Q_п=125$
Форма паза	Овальная
Ротор электродвигателя	Короткозамкнутый
Исполнение электродвигателя	Защищенное

Расчет

Число полюсов электродвигателя, соответствующее его размерам по формуле (58) $2p=0{,}6D/h_{c1}=0{,}6\cdot 14{,}5/2{,}8=3{,}1$ — округляется до ближайшего четного числа — 4.

Отношение наружного и внутреннего диаметров сердечника статора $D_{н1}/D_1=23{,}1/14{,}5=1{,}59$ соответствует четырехполюсным электродвигателям

Таким образом, есть основания предполагать, что заданная заказчиком частота вращения не является оптимальной, и дальнейшие расчеты производятся по двум вариантам

при числе полюсов $2p=6$ — согласно заданию

при числе полюсов $2p=4$ согласно размерам электродвигателя

	при $2p=6$	при $2p$ 4
$Z_2 \neq Z_1$	$26 \neq 36$	$26 \neq 36$
$Z_2 \neq 0{,}5Z_1$	$26 \neq 18$	$26 \neq 18$
$Z_2 \neq 2Z_1$	$26 \neq 72$	$26 \neq 72$
$Z_2 \neq 6pk$	$26 \neq 18$, 36, 54, 72	$26 \neq 12$, 24, 36 и 48
$Z_2 \neq Z_1 \pm p$	$26 \neq 33$, 39	$26 \neq 34$ и 38
$Z_2 \neq Z_1 + 2p$	$26 \neq 42$	$26 \neq 40$
$Z_2 \neq 0{,}5Z_1 \pm p$	$26 \neq 15$ и 21	$26 \neq 16$ и 20
$Z_2 \neq 2Z_1 + 2p$	$26 \neq 78$	$26 \neq 76$
$Z_2 \neq 6pk \pm 1$	$26 \neq 17$, 19, 35, 37, 53, 55, 71 и 73	$26 \neq 11$, 13, 23, 25, 35, 37, 47 и 49
$Z_2 \neq 6pk \pm (2p \pm 1)$	$26 \neq 1$, 13, 23, 25, 29, 31, 41, 43, 47, 49 59, 61, 65, 67, 77 и 79	$26 \neq 7$, 9, 15, 17, 19, 21, 27, 29, 31, 33, 39, 41, 43, 45, 51 и 53

Полюсное деление статора — по формуле (4): при $2p=6$ $\tau_1=3{,}14\cdot 14{,}5/6=7{,}6$ см; при $2p=4$ $\tau_1=3{,}14$ $14{,}5/4=11{,}4$ см

Ориентировочная мощность электродвигателя по формуле (59): при $2p=6$ (по рис 24 $A=1{,}0\cdot 10^{-6}$) $P=1{,}0\cdot 10^{-6}$ $14{,}5^2\cdot 23{,}5\cdot 1000=5{,}0$ кВт;

при $2p=4$ (по рис. 24 $A=1{,}15\cdot 10^{-6}$), P $1{,}15\cdot 10^{-6}\cdot 14{,}5^2$ $23{,}5\cdot 1500==8{,}5$ кВт.

Зубцовый шаг статора по формуле (5) $t_{з1}=3{,}14\cdot 14{,}5/36$ $1{,}26$ см

Зубцовый шаг ротора по формуле (20) $t_{з2}=3{,}14$ $14{,}42/26==1{,}74$ см.

Активная длина сердечника статора по формуле (6) $l_{a1}=0{,}93(23{,}5-2\cdot 1{,}0)=20$ см.

Активная длина сердечника ротора по формуле (21) $l_{a2}=0{,}93(24{,}2-2\cdot 1{,}0)=20{,}6$ см

Расчетная ширина зубца статора по формуле (7) $b_{з1}$ $(2$ $0{,}6/3)++(0{,}83/3)=0{,}68$ см.

Расчетная ширина зубца ротора по формуле (22) $b_{з2}=(2\cdot 0{,}9/3)++(1{,}2/3)=1{,}0$ см.

Индукция в воздушном зазоре принимается (предварительно) по максимальному значению таблицы 5 для электродвигателей мощностью 1—10 кВт $B_\delta=0{,}7$ Т

Индукция в зубцах статора по формуле (12) $B_{з1}=0{,}7\cdot 1{,}26\times\times 23{,}5/(0{,}68\cdot 20{,}0)=1{,}52$ Т.

Индукция в зубцах ротора по формуле (23) $B_{з2}=0{,}7\cdot 1{,}74\times\times 24{,}2/(1{,}0\cdot 20{,}6)=1{,}43$ Т.

Индукция в спинке статора по формуле (13)

при $2p=6$

$$B_{c1}=0{,}55\ 0{,}7\cdot 14{,}5\ 23{,}5/(2{,}8\cdot 20{,}0\cdot 3)=0{,}78\ \text{Т};$$

при $2p=4$

$$B_{c1}=0{,}55\ 0{,}7\cdot 14{,}5\ 23{,}5/(2{,}8\cdot 20{,}0\cdot 2)=1{,}17\ \text{Т}$$

Индукция в спинке ротора по формуле (24).

при $2p=6$

$$B_{c2}=0,55\cdot 0,7\cdot 14,42\cdot 24,2/(2,6\cdot 20,6\cdot 3)=0,83\ \text{T}$$

при $2p=4$

$$B_{c2}=0,55\cdot 0,7\cdot 14,42\cdot 24,2/(2,6\cdot 20,6\cdot 2)=1,26\ \text{T}$$

Результаты подсчета показывают, что при $2p=6$ индукции в спинках статора и ротора занижены; при частоте вращения, соответствующей этому числу полюсов, электродвигатель будет недостаточно использован.

При $2p=4$ (частота вращения 1500 об/мин) индукции в спинках статора и ротора соответствуют рекомендованным значениям, приведенным в таблице 5, что указывает на полное использование электродвигателя.

Таким образом, задание заказчика не предусматривает оптимальное использование электродвигателя, его следует признать ошибочным. Дальнейший расчет электродвигателя производится при $2p=4$.

Для еще более полного использования электродвигателя целесообразно несколько повысить величину предварительно выбранной индукции в воздушном зазоре и тем самым увеличить индукцию в спинках и зубцах сердечников статора и ротора; хотя при $2p=4$ эти индукции соотносятся с рекомендациями таблицы 5, они находятся на нижнем пределе допустимых значений. Целесообразно увеличить B_δ до 0,75 Т. При этом индукции в зубцах и спинках сердечников статора и ротора также повысятся и составят Т

$$B_{з1}=0,75\cdot 1,52/0,70=1,63\ \text{T},$$

$$B_{з2}=0,75\cdot 1,43/0,70=1,53\ \text{T},$$

$$B_{c1}=0,75\cdot 1,17/0,70=1,25\ \text{T};$$

$$B_{c2}=0,75\cdot 1,26/0,70=1,35\ \text{T}$$

Выбираем тип обмотки согласно пункту 5 данного расчета. Принимаем двухслойную обмотку с укорочением шага 0,75÷0,85.

Шаг обмотки $y_{п1}=(0,75\div 0,85)Z_1/2p=(0,75\div 0,85)36/4=6,8\div 7,7$. Принимается (целое число) $y_{п1}=7(1-8)$, при котором укорочение шага составит

$$\beta_1=y_{п1}2p/Z_1=7\cdot 4/36=0,775$$

Так как в таблице 6 не приведен обмоточный коэффициент для этого укорочения шага, его следует определить интерполированием между двумя приведенными значениями укорочения шага — 0,75 и 0,8, согласно чему $k_о=0,937$.

Согласно таблице 14, число параллельных ветвей в фазе может быть равным 1 или 2. При $a_1=1$ число эффективных проводов в пазу по формуле (8)

$$w_{эп1}=2,5\cdot 220\cdot 2\cdot 1\cdot 10^2/(0,75\cdot 36\cdot 14,5\cdot 23,5\cdot 0,937)=12,7$$

Полученное число следует округлить до ближайшего целого числа, т. е. до 13. Однако для двухслойной обмотки желательно, чтобы число эффективных проводов в пазу было четным. В противном случае пришлось бы применять обмотку, состоящую из неравновитковых катушек, в нашем случае 7- и 6-витковых.

При $w_{эп1}=14$ индукции в воздушном зазоре, в зубцах и спинках сердечников понизятся и составят, Т.

$$B_\delta = 12{,}7\cdot 0{,}75/14{,}0=0{,}68,\quad B_{з1}=12{,}7\cdot 1{,}63/14{,}0=1{,}48;$$

$$B_{з2}=12{,}7\cdot 1{,}53/14{,}0=1{,}39,\quad B_{c1}=12{,}7\cdot 1{,}25/14{,}0=1{,}13;$$

$$B_{c2}=12{,}7\cdot 1{,}35/14{,}0=1{,}22$$

При $w_{эп1}=12$ индукции в воздушном зазоре в зубцах и спинках сердечников повысятся:

$$B_\delta=12{,}7\cdot 0{,}75/12{,}0=0{,}8,\quad B_{з1}=12{,}7\cdot 1{,}63/12{,}0=1{,}72,$$

$$B_{з2}=12{,}7\cdot 1{,}53/12{,}0=1{,}62;\quad B_{c1}=12{,}7\cdot 1{,}25/12{,}0=1{,}32,$$

$$B_{c2}=12{,}7\cdot 1{,}35/12{,}0=1{,}43.$$

Все вычисленные индукции находятся в пределах, указанных в таблице 5, или близки к ним. При $a_1=2$

$$w_{эп1}=2{,}5\cdot 220\cdot 2\cdot 2\cdot 10^2/(0{,}75\cdot 36\cdot 14{,}5\cdot 23{,}5\cdot 0{,}937)=25{,}4\approx 26$$

Сравнив варианты обмотки при $a_1=1$ и $a_1=2$, отдаем предпочтение обмотке без параллельных ветвей в фазе ($a_1=1$) при $w_{эп1}=12$. значение коэффициента заполнения паза и использование активных частей электродвигателя здесь более высокие, чем в обмотке с двумя параллельными ветвями в фазе ($a_1=2$) и $w_{эп1}=14$.

Как показывает дальнейший расчет, при $a_1=1$ диаметр изолированного элементарного проводника не превышает допустимого значения.

Сечение изолированного провода находим по формуле (18), при коэффициенте заполнения паза медью, равном 0,4 (табл. 5), оно рассчитывается при трех вариантах числа элементарных проводников в эффективном проводе: $m_1=1$, 2 и 3.

При $m_1=1$

$$q_{и1}=0{,}4\cdot 125/(1\cdot 12)=4{,}17\ мм^2;\quad d_{и1}=1{,}13\sqrt{4{,}17}=2{,}3\ мм$$

При $m_1=2$

$$q_{и1}=0{,}4\cdot 125/(2\cdot 12)=2{,}08\ мм^2;$$

$$d_{и1}=1{,}13\sqrt{2{,}08}=1{,}63\ мм$$

При $m_1=3$

$$q_{и1}=0{,}4\cdot 125/(3\cdot 12)=1{,}39\ мм^2,\quad d_{и1}=1{,}13\sqrt{1{,}39}=1{,}34\ мм.$$

Предпочтение следует отдать обмотке с тремя элементарными проводниками в эффективном проводе $m_1=3$, при обмотке с $m_1=1$ диаметр изолированного проводника превосходит предельный, а при $m_1=2$ — близок к предельному.

Выбираем обмоточный провод ПЭЛБО, двухсторонняя толщина изоляции которого при указанном диаметре изолированного провода, согласно таблице 17, составляет 0,21 мм $d_1=1{,}34-0{,}21=1{,}13$ мм.

По таблице 16 выбираем провод ближайшего стандартного диаметра: $d_1=1{,}12$ мм, сечение которого $q_1=0{,}985$ мм.

Фазовый ток вычисляем по формуле (14) при трех вариантах плотности тока (согласно табл. 5), $j=5{,}0$, 5,5 и 6,0 А/мм²

При $j_1=5$ А/мм² $I_{ф1}=5\cdot 0{,}985\cdot 3\cdot 1=14{,}7$ А.

При $j_2=5{,}5$ А/мм² $I_{ф1}=5{,}5\cdot 0{,}985\cdot 3\cdot 1=16{,}3$ А

При $j_1=6{,}0$ А/мм² $I_{ф1}=6{,}0\cdot 0{,}985\cdot 3\cdot 1=17{,}7$ А

Линейная нагрузка — по формуле (17) при указанных трех значениях

при $I_{\phi 1} = 14{,}7$ А

$$A_1 = 14{,}7 \cdot 36 \cdot 12/(3{,}14 \cdot 14{,}5 \cdot 1) = 140 \text{ А/см},$$

при $I_{\phi} = 16{,}3$ А

$$A_1 = 16{,}3 \cdot 36 \cdot 12/(3{,}14 \cdot 14{,}5 \cdot 1) = 155 \text{ А/см},$$

при $I_{\phi 1} = 17{,}7$ А

$$A_1 = 17{,}7 \cdot 36 \cdot 12/(3{,}14 \cdot 14{,}5 \cdot 1) = 168 \text{ А/см}.$$

Все три значения не превышают допустимые, указанные в таблице 5

Произведение $j_1 A_1$ (фактор нагрева) при указанных трех значениях $A_1 = 140$, 155 и 168 А/см и максимальном значении $j_1 = 6{,}0$ А/мм²

при $A_1 = 140$ А/см

$$j_1 A_1 = 6 \cdot 140 = 840 \text{ А}^2/(\text{мм}^2 \cdot \text{см});$$

при $A_1 = 155$ А/см

$$j_1 A_1 = 6 \cdot 155 = 930 \text{ А}^2/(\text{мм}^2 \cdot \text{см});$$

при $A = 168$ А/см

$$j_1 A_1 = 6 \cdot 168 = 1008 \text{ А}^2/(\text{мм}^2/\text{см})$$

Все три значения $j_1 A_1$ не выше допустимых, указанных в таблице 5, поэтому принимается максимальное значение — 1008 А²/мм² см (чему соответствует $I_{\phi 1} = 17{,}7$ А), при котором использование электродвигателя будет более полным, чем при двух других значениях фазового тока.

Номинальная мощность электродвигателя по формуле (15) При значениях $\eta = 87{,}5\%$ и $\cos\varphi = 0{,}88$, согласно таблице 7,

$$P = \sqrt{3} \cdot 17{,}7 \cdot 380 \cdot 0{,}875 \cdot 0{,}88/1000 = 9 \text{ кВт},$$

что практически совпадает с мощностью электродвигателя, определенной ранее ориентировочно

РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ВИТКА КАТУШКИ И МАССЫ ОБМОТКИ

Средняя длина витка обмотки, см, с мягкими (всыпными) катушками

$$l_{ср} = [K(D + h_з y_п)/Z] + 2l_с + 6,$$

где D — внутренний диаметр сердечника статора (или наружный диаметр сердечника ротора), см;

$h_з$ — высота зубца, см;

$y_п$ — шаг обмотки по пазам;

Z — число пазов,

$l_с$ — длина сердечника, см;

k — коэффициент, определяемый по таблице 19.

В скобках знак плюс относится к обмотке статора, знак минус — к обмотке ротора.

Таблица 19

Число полюсов, $2p$	Значение коэффициента K	
	для двухслойной обмотки	для однослойной обмотки
2	8,2	9,2
4	8,5	9,5
6	9,1	10,2
8 и более	9,8	11,0

Масса, кг, изолированного медного провода трех фаз обмотки составляет (с округлением):

$$G = 5 l_{ср} w_{эп} m Z q 10^{-5},$$

где $l_{ср}$ средняя длина витка катушки, см;
$w_{эп}$ — число эффективных проводов в пазу;
m — число элементарных проводников в эффективном проводе;
q сечение неизолированного элементарного проводника, мм²;
Z — число пазов

Для определения веса обмотки из алюминиевого провода следует в приведенной формуле цифру 5 заменить на 1,5.

1. Альбом технологических карт на ремонт трехфазных электродвигателей, БТИ ГОСНИТИ, М., 1957

2. Бабенко Д. А., Тепленко С. И., Чибишев Л. Д. В помощь электрику-обмотчику асинхронных электродвигателей. М., «Энергия», 1965.

3. Девятков А. Ф. и др. Ремонт электросилового оборудования, М., «Колос, 1971.

4. Жерве Г. К. Расчет асинхронного двигателя при ремонте. М., «Энергия», 1967.

5. Зимин В. И. и др. Обмотки электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1970

6. Кокорев А. С. Справочник молодого обмотчика электрических машин. М., «Высшая школа», 1969.

7. Кравчик Э. Д. Расчет обмоток низковольтных асинхронных двигателей при ремонте. ЦБТИ МЭП, М., 1963.

8. Маршак Е. Л., Уманцев Р. Б. Схемы обмоток статоров. М., «Энергия», 1967

9. Маршак Е. Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1970.

10. Никулин Н. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. М., «Высшая школа», 1967.

11. Организация и технология ремонта электрических машин. Московский дом научно-технической пропаганды, М., 1959.

12. Обмоточные данные асинхронных двигателей. Конструкторско-технологическое бюро по ремонту электрооборудования под ред. П. И. Цибулевского. М., «Энергия», 1971.

13. Пястолов А. А., Шац Е. Л., Блюмберг В. А. Эксплуатация и ремонт электрооборудования. М., «Колос», 1966.

14. Слоним Н. М. Алюминиевые провода при ремонте асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1973.

15. Уманцев Р. Б. Конструкция и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей. М., «Энергия», 1967.

СОДЕРЖАНИЕ

Маршак Евсей Львович

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

Редактор *Т. М. Микая.*
Художественный редактор *Н. Ф. Шлезингер.*
Технический редактор *Г. Б. Славнова.*
Корректор *А. В. Пригарина.*

Сдано в набор 15/XI 1973 г. Подписано к печати 31/I 1974 г. Формат $84 \times 108^1/_{32}$. Бумага тип. № 3 Усл.-печ. л 5,88. Уч.-изд л 6,35. Изд. № 4 Тираж 27 000 экз. Заказ № 6595 Цена 17 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос», 103716, ГСП, Москва, К-31, ул. Дзержинского, д. 1/19.

Типография им. Смирнова Смоленского облуправления издательств, полиграфии и книжной торговли, г. Смоленск, пр. им. Ю. Гагарина, 2.

